

**ГЕНЕЗИС  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
САМОРОДНОЙ СЕРЫ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ  
ИХ ПОИСКОВ**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО • НАУКА •**

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОМИССИЯ ПО ОСАДОЧНЫМ ПОРОДАМ ПРИ ОТДЕЛЕНИИ  
ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ И ГЕОХИМИИ

МИНИСТЕРСТВО ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГОРНОХИМИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

553.661

ГЕНЕЗИС  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
САМОРОДНОЙ СЕРЫ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ  
ИХ ПОИСКОВ

884



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
Москва 1974



Сборник содержит материалы, освещающие современные представления о генезисе месторождений серы. Рассмотрены литологические, тектонические, минералого-геохимические и другие закономерности строения, размещения и образования месторождений самородной серы, генетическая связь ее с углеводородами. Освещаются вариации изотопного состава серы и углерода в процессе формирования залежей серно-кальцитовых руд. На конкретных примерах раскрыты геолого-геохимические условия образования месторождений серы инфильтрационно-метасоматическим путем по гипс-ангидритам.

Охарактеризованы новые геохимические и ядерно-геофизические методы поисков серы, способы прогноза и оценки перспектив сероносности отдельных регионов. Дано геолого-генетическое обоснование направления поисковых работ на серу в перспективных районах. Рассмотрена генетическая связь месторождений самородной серы с залежами сернистых горючих газов.

Редколлегия:

Г.М. ВДОВИЧЕНКО, А.С. ЗВЕРЕВ, А.С. СОКОЛОВ  
(ответственный редактор), Ю.Ф. ШМЕЛЬКОВА

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В развитии химической и других отраслей промышленности сера занимает одно из важных мест. Ведущее место среди различных видов серосодержащего сырья принадлежит самородной сере.

Для дальнейшего развития серной промышленности СССР и удовлетворения быстро растущих потребностей производства серной кислоты и других серосодержащих продуктов требуется значительное увеличение сырьевых ресурсов серы, в том числе и запасов самородной серы, добываемой методом подземной выплавки (ПВС), что даст возможность значительно увеличить диапазон глубины промышленных залежей серы. В связи с этим резко возрастает необходимость научно обоснованного крупномасштабного прогноза и разработки новых методов поисков, в особенности геофизических и геохимических.

Настоящий сборник содержит статьи, подготовленные представителями различных организаций, выполняющих геологические исследования, а также поиски и разведку серных месторождений. В сборнике рассматриваются вопросы, касающиеся геологической оценки месторождений самородной серы СССР и путей ее освоения, вопросы прогнозирования, перспектив сероносности, а также направление поисково-разведочных работ. Основное внимание уделено вопросу генезиса серных месторождений, представляющему большое научное значение для общего развития геологии и геохимии, научного обоснования геологических критериев прогноза и поисков. Особенно интересны статьи, посвященные методам поисков месторождений серы, в частности потенциометрическому.

Особое внимание уделено парагенезису серы с углеводородами, геолого-геохимическому сопоставлению месторождений самородной серы и сернистых горючих газов и нефтей, а также использованию в качестве источников серы высокосернистых горючих газов.

Большинство рассмотренных вопросов обсуждалось на семинаре "Генезис месторождений серы и перспективы их поисков и разведки", проходившем в пос. Гаурдак в октябре 1971 г. и организованном Секцией литологии фосфоритоносных и галогенных формаций Комиссии по осадочным породам при Отделении геологии, геофизики и геохимии АН СССР совместно с Управлением геологии Совета Министров Туркменской ССР, Гаурдакским серным комбинатом и ГИГХСом Министерства химической промышленности СССР.

Редколлегия надеется, что настоящий сборник заинтересует геологов и поможет провести широкий обмен опытом по прогнозу, поискам и разведке месторождений самородной серы, а также выявить наиболее эффективные методы геологоразведочных работ на серу.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА СЕРУ

Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 гг. четко определена прогрессивная роль химизации в развитии промышленности и сельского хозяйства. Опережающие темпы роста химической промышленности обуславливают необходимость расширения минерально-сырьевых ресурсов, в том числе и серы, которая является одним из важнейших видов полезных ископаемых и широко применяется в различных отраслях промышленности и в сельском хозяйстве. Согласно Директивам XXIV съезда КПСС<sup>1</sup>, необходимо "... проведение исследований в области геологии, геофизики и геохимии для выявления закономерностей размещения полезных ископаемых, повышения эффективности методов их поиска, добычи и обогащения".

Тематика совещаний по геологии самородной серы всегда отвечала состоянию развития геологоразведочных и научно-исследовательских работ. Так, на совещании, состоявшемся в Новом Роздоле (1963 г.), был подведен общий итог состояния научно-исследовательских и геологоразведочных работ и определено главное направление дальнейших исследований. На совещании в Казани (1966 г.) проведен обмен опытом по составлению прогнозных карт, а совещание в ИГЕМ АН СССР (1969 г.) было посвящено проблеме геохимии и минералогии серы. На семинаре в пос. Гаурдак (1971 г.) обсуждался весьма важный вопрос — генезис серы, имеющий весьма важное значение для открытия новых месторождений.

Из всех источников серосодержащего сырья ведущая роль в мировой серной промышленности принадлежит самородной сере. Вторым по значению источником являются сероводородсодержащие природные газы. Значительные ресурсы серы содержатся также в отходящих промышленных газах, сернистых нефтях и сульфидных рудах.

В настоящее время геологоразведочные и научно-исследовательские работы на самородную серу осуществляются в трех основных направлениях: 1) расширение сырьевых баз действующих предприятий; 2) поисково-ревизионные и прогнозные исследования с составлением разномасштабных карт; 3) выявление и оценка новых перспективных районов и месторождений серы.

За истекший период проведены значительные работы в области геологии серы и получены определенные результаты.

Задания по приросту запасов в целом по СССР выполнены с превышением, однако намечавшийся прирост балансовых запасов по Дальнему Востоку по ряду причин не получен.

В Предкарпатском сероносном бассейне проведена переоценка запасов глубоких, недоступных для карьерной отработки горизонтов, решен

<sup>1</sup> Материалы XXIV съезда КПСС. М., Политиздат, 1971, стр. 244.

вопрос их освоения методом ПВС на значительной площади Язовского месторождения; начата оценка Немировского и других месторождений. В юго-восточной части бассейна выявлено и предварительно оценено для ПВС новое Загайпольское месторождение.

На Гаурдакском месторождении проведена доразведка участков для карьерной эксплуатации и осуществлены специальные гидрогеологические исследования и опытные экспериментальные работы по ПВС; в настоящее время месторождение подготовлено для промышленного освоения этим методом.

Начаты работы по установлению возможностей применения метода ПВС на серных месторождениях Среднего Поволжья, однако до сих пор они не получили должного развития. Специфические горно-геологические условия серных месторождений Среднего Поволжья потребуют, очевидно, значительного совершенствования метода ПВС, возможно, принципиально нового решения в части подготовки теплоносителя в отличие от тех, которые в условиях Предкарпатья и Средней Азии дают весьма положительные результаты.

Освоение метода ПВС в промышленных масштабах открывает широкие перспективы вовлечения в эксплуатацию дополнительных запасов серы и определяет ввод в поиски и разведку новых площадей в Предкарпатья, Средней Азии, Поволжье и других районах с большими глубинами залегания серы. Это в свою очередь ставит важные задачи прогнозирования и обоснования новых районов и площадей для постановки поисковых и разведочных работ на самородную серу, при решении которых вопросы генезиса имеют первостепенное значение.

На Дальнем Востоке в результате исследований, проведенных научно-исследовательскими и производственными организациями Министерства геологии СССР, Министерства химической промышленности СССР и Дальневосточным филиалом СО АН СССР, определены масштабы сероносности Северной Камчатки и Курильских островов (о. Итуруп). Полученные данные позволяют рассматривать этот район как один из крупных сероносных районов, выявленных за последнее десятилетие. Однако оценка общих перспектив сероносности Камчатки и Курильской гряды еще не закончена. Открытые и предварительно разведанные (Малетойваямское и Новое) месторождения по запасам представляют определенный промышленный интерес и смогут, вероятно, обеспечить серой действующие предприятия бумажной, химической и других отраслей промышленности Дальнего Востока. Однако детальная разведка этих месторождений и последующее освоение их задерживаются из-за отсутствия экономически эффективных систем добычи и способов технологического передела. Актуальность этих вопросов очевидна.

Прогнозными исследованиями определены перспективы весьма крупного Приуральского сероносного района. Здесь установлен ряд серопроявлений с промышленным содержанием серы. В Актюбинской области промышленное значение имеет Подгорненская структура, где довольно четко оконтуривается площадь, в пределах которой может быть выявлено месторождение с крупными запасами. Продолжаются работы по прогнозной оценке Тимано-Печорской нефтегазоносной области, районов Северного Кавказа, Керченского полуострова. Составлены прогнозные

карты по ряду районов Восточно-Европейской и Средне-Азиатской провинций, Предкарпатья. Изучаются перспективы сероносности Днепро-Донецкой и Прикаспийской впадин.

В зарубежной практике все большее внимание уделяется промышленному использованию серы месторождений сероводородсодержащих природных горючих газов.

В Советском Союзе изучение подобных месторождений начато в самое последнее время. Промышленные содержания сероводорода установлены в ряде газоносных районов, по некоторым месторождениям уже дана прогнозная оценка запасов серы. На Оренбургском, Уртабулакском и Саман-Тепинском сероводородсодержащих газоконденсатных месторождениях утверждены промышленные запасы серы и на их базе ведется сооружение газоперерабатывающих установок по получению элементарной серы. Запасы этих месторождений соизмеримы с запасами крупных месторождений самородной серы; значительные запасы серы содержатся также в сернистых нефтях. Оценка и учет ресурсов серы, заключенных в месторождениях серосодержащих газов и нефтей, существенно меняют структуру ее баланса.

Изучение генезиса и условий формирования месторождений сероводородсодержащих газовых и сернистых нефтей является весьма важной проблемой, приобретающей не только теоретический, но и большой практический интерес. К разрешению этой проблемы должно быть привлечено внимание ученых, занимающихся изучением самородной серы.

Наряду с известными положительными результатами научно-исследовательских и геологоразведочных работ имеются недостатки, вызванные отставанием теоретических разработок вопросов генезиса серы. Это неизбежно отражается на понимании геологических позиций вовлекаемых в разведку месторождений, прогнозировании перспективных районов и площадей, обосновании методики и на разведке месторождений различных генетических типов и, в конечном счете, сказывается на эффективности геологоразведочных работ.

Причины этих недостатков различны.

Научно-теоретические причины. Поиски и разведка серных месторождений, проведенные в последний период на основе глубокого теоретического анализа полученных материалов и обобщения опыта отечественных и зарубежных ученых, дали принципиально новые представления о геологии и генезисе месторождений самородной серы в СССР. Развитие науки об этих месторождениях шло по пути выявления и теоретического обоснования закономерностей их размещения и строения, установления поисковых критериев и разработки методов поисков и разведки, а также по пути накопления опыта прогнозирования сероносности как в осадочных, так и в вулканических образованиях по отдельным районам и регионам.

В настоящее время существует несколько гипотез генезиса самородной серы. Интересно отметить, что в процессе накопления фактов все большее число исследователей склоняются к гипотезам эпигенетического образования серы.

Несмотря на длительность дискуссии о генезисе серы, по мере проведения научных исследований продолжают выдвигаться все новые

и новые гипотезы, однако синтеза генетических концепций до сего времени не сделано. А это очень важно, так как на генетической основе строится методология поиска, которая или приводит к успешному открытию новых месторождений, или вызывает ряд ошибок, ведущих к неоправданному расходованию средств и потере времени. При всей сложности рассматриваемого вопроса настало время прийти к определенным выводам, что и было основной задачей прошедшего в Гаурдаке семинара. Эти выводы должны быть сделаны на основе острой, объективной творческой критики взглядов с широким привлечением в доказательство как можно большего количества геологических фактов, лабораторных опытов, теоретических расчетов и выкладок. Следует, однако, отметить, что исследованиям в области лабораторного моделирования природных процессов совершенно незаслуженно уделяется крайне недостаточное внимание. Иногда положения, правильные для одних районов, механически переносятся на другие районы, где они не согласуются с геологическими позициями.

Генетические взгляды должны базироваться на геологических закономерностях размещения и формирования месторождений серы. Однако сделано в этом направлении еще очень мало — геологические закономерности, установленные профессором А.С. Соколовым более 15 лет назад, не были существенно дополнены и детализированы. Такие критерии, как связь этих месторождений с углеводородами, гидрогеохимическая и минералогическая обстановка, используются при прогнозировании без должной эффективности.

Результатом этих упущений является отсутствие инструкции по составлению региональных прогнозных карт. Вышедшее в 1968 г. "Краткое методическое руководство по прогнозу месторождений серы в осадочных образованиях" не обеспечивает решения конкретных вопросов (масштаб карт, объемы и виды работ, этапность проведения работ и т.п.).

На основе обобщения накопившегося опыта в производственных и научно-исследовательских организациях необходимо в самое ближайшее время разработать конкретные требования (кондиции) к содержанию и качеству региональных прогнозных карт и унифицировать методику их составления, четко выделив этапы и объемы полевых и камеральных работ.

Методологические и методические причины. Для оценки локальных сероносных структур кроме качественной характеристики закономерностей размещения серных месторождений необходимо иметь и количественные параметры, по которым можно судить о законченности процесса серообразования на данной площади и месте локализации серных залежей. Установить такие количественные параметры для поисков, их взаимозависимость и связь с осернением можно, очевидно, только на основе привлечения новых методов и приемов, таких, как гео- и гидрохимические, газово-химические, геофизические, микробиологические и др. По некоторым из них уже проведены значительные исследования и получены весьма интересные и обнадеживающие результаты. В последние годы изучался также изотопный состав серы и углерода, однако полученные результаты в практической работе, связанной с прогнози-

рованием перспективных сероносных районов, поисками и разведкой серных месторождений, использовались мало. Внедрение в науку и практику новых прогрессивных методов, более информативных и поддающихся количественной интерпретации, является одной из первоочередных задач.

Конъюнктурные причины. Отсутствие четкого представления о роли и значении самородной серы в общем балансе серосодержащего сырья страны неизбежно отражается на планировании работ по поискам и разведке таких месторождений серы. Представление о том, что вся потребность в серосодержащем сырье для производства серной кислоты может быть полностью удовлетворена за счет использования колчеданных (сульфидных) руд, привело к тому, что в конце 50-х и начале 60-х годов геологоразведочные работы на самородную серу были сильно сокращены, а в ряде районов полностью прекращены. Выявившиеся потенциальные ресурсы серы, связанные с месторождениями природных газов и сернистых нефтей, и возможность использования их в промышленности ни в коей мере не должны отражаться на научных исследованиях и геологоразведочных работах на самородную серу. Опережающее развитие химической промышленности и особенно намеченное резкое увеличение производства фосфорных удобрений потребуют в ближайшее время значительного увеличения выпуска серной кислоты, что в свою очередь вызовет необходимость освоения дополнительных источников серы, заключенных в месторождениях серосодержащих газов и нефтей.

Планирующим органам и ведомствам, имеющим предприятия, потребляющие серу, необходимо определить структуру потребления и производства самородной серы в целом по СССР и по отдельным районам с учетом использования различных источников серосодержащего сырья.

Технологические причины. В связи с успешным применением метода ПВС повышается степень использования ресурсов самородной серы разведанных месторождений за счет освоения глубокозалегающих горизонтов, расширяются перспективы выявления новых месторождений, пригодных к эксплуатации. Внедрение метода ПВС в промышленных масштабах предопределяет необходимость соответствующей ориентации геологоразведочных и научно-исследовательских работ на всех этапах.

Из-за недоработки технологических способов передела серных руд вулканогенных месторождений были сокращены геологоразведочные работы на серу на Дальнем Востоке.

Медленно разрабатываются кондиции для месторождений, пригодных для отработки методом ПВС.

Организационно-технические причины. Сложность геологических условий серных месторождений, трудности их поиска, конъюнктурные причины порождают различные мнения о необходимости проведения геологоразведочных работ на самородную серу в ряде территориальных подразделений. Часто отдельные руководители не придают должного значения вопросам разработки направлений геологоразведочных работ и тематических исследований, подбору и специализации кадров, оснащению этих работ современной аппаратурой и техническими средствами, что неизбежно приводит к снижению эффективности работ. Нередки случаи,

когда научные исследования ведутся без учета запросов производственных организаций, длительное время задерживается решение актуальных вопросов.

До настоящего времени не организованы попутные поиски серы при бурении на нефть, подземные воды и другие виды полезных ископаемых. Очень сложно и подолгу решаются вопросы изучения технологии обогащения и переработки различных типов серных руд, разработки кондиций и т.д.

В 9-й пятилетке выделяются большие ассигнования на поиски и разведку месторождений самородной серы, поэтому весьма остро поставлен вопрос о резком повышении эффективности работ и их реальной отдаче.

В целом по Советскому Союзу в новом пятилетии необходимо:

1. Завершить составление региональных прогнозных карт разного масштаба по всем сероносным провинциям, бассейнам и регионам Союза, с тем, чтобы иметь необходимый фонд перспективных площадей для проведения поисковых работ. При этом должны быть учтены ресурсы сероводорода в углеводородных газах, подземных водах серных месторождений и т.д.

2. Провести большой объем крупномасштабных ревизионно-поисковых работ, главным образом в экономически выгодных районах и вблизи действующих предприятий с целью выявления новых площадей для постановки разведочных работ.

3. Обеспечить планируемый прирост запасов как за счет доразведки эксплуатируемых, так и за счет выявления и разведки новых месторождений.

Успешное выполнение намеченной программы зависит от того, насколько быстро будут синтезированы генетические гипотезы и обеспечены прогнозно-поисковые работы стройной рабочей теорией серообразования. Зависит это и от того, как широко и многообразно будут применяться при поисках и разведках геофизические, геохимические, микробиологические, геоботанические и другие методы и насколько правильно будет разработана методика поисков.

Для эффективного внедрения новых методов и правильной интерпретации их результатов требуются высокая квалификация, узкая специализация и творческая инициатива геологов. Поэтому следует обратить самое серьезное внимание на правильную расстановку сил и распределение обязанностей между полевыми подразделениями, а также организацию курсов, проведение различных семинаров для широкого обмена опытом.

На проведенном в Гаурдаке совещании были подведены итоги познания геологии серных месторождений и на основе научных достижений и технического прогресса разработаны конкретные предложения по методологии прогнозирования, поисков и разведке месторождений с целью повышения эффективности геологоразведочных работ на самородную серу.

## ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СЕРЫ

Несмотря на значительное расширение ассортимента используемого серосодержащего сырья и быстрое возрастание роли попутной серы, самородная сера в мировой продукции продолжает занимать ведущее место. Главными тенденциями современного развития серной промышленности являются быстрый рост добычи серы из серосодержащих горючих газов, продолжающееся увеличение добычи самородной серы методом подземной выплавки и успешное применение этого метода не только на солянокупольных (США, Мексика), но и на пластообразных месторождениях (ПНР, США, СССР), связанных с гипс-ангидритовыми толщами нормального осадочного происхождения.

### Сероносные провинции и главнейшие месторождения самородной серы

При изучении любого полезного ископаемого нас прежде всего интересует его пространственное распространение, причем не только в нашей стране, но и по всему земному шару.

Общие мировые запасы самородной серы зарубежных стран оцениваются сейчас в 1,5 млрд. т. На первое место по запасам серы за последние годы вышла Польша; второе место занимает Ирак с запасами более 300 млн. т и с хорошими перспективами дальнейшего их увеличения. Запасы США обычно оцениваются в 150–200 млн. т, но они, вероятно, более значительны, особенно если учесть ресурсы нового сероносного бассейна в Западном Техасе. Далее следует Мексика с запасами в 110 млн. т. Остальные страны имеют запасы уже менее 100 млн. т. Серные месторождения распространены на земном шаре очень неравномерно (см. рисунок). Они сконцентрированы в выделенных автором (Соколов, 1949, 1959) шести сероносных провинциях. В двух из них — Кордильерской и Восточно-Азиатской — расположены вулканогенные месторождения серы, на которые приходится примерно 12% ее мировых запасов. Эти две провинции иногда объединяются в Тихоокеанский пояс, общие запасы серы в котором Г.М. Власовым (1969) прогнозно оцениваются в 500 млн. т. Остальные четыре провинции заключают экзогенные месторождения серы. Это Средиземноморская провинция, непосредственно продолжающая ее к востоку Среднеазиатская провинция, Восточно-Европейская и провинция Мексиканского залива, где сконцентрированы всемирно известные месторождения серы солянокупольного типа.

Обычно при изучении распространения любых полезных ископаемых кроме провинций выделяют и более дробные площади (Смирнов, 1969). Можно выделить их и для месторождений серы:

1) сероносные области или бассейны, в которых концентрируются более или менее сходные по происхождению месторождения, приуроченные к крупным тектоническим элементам первого порядка;

2) сероносные районы – отдельные части бассейнов или областей, характеризующиеся сосредоточением генетически однотипных месторождений;

3) сероносные поля, представляющие собой концентрацию группы месторождений;

4) месторождения, их участки и отдельные сероносные залежи;

5) серопроявления, характеризующиеся кондиционным серосодержанием, но невыясненными масштабами, а следовательно и промышленным значением;

6) точки нахождения серной минерализации.

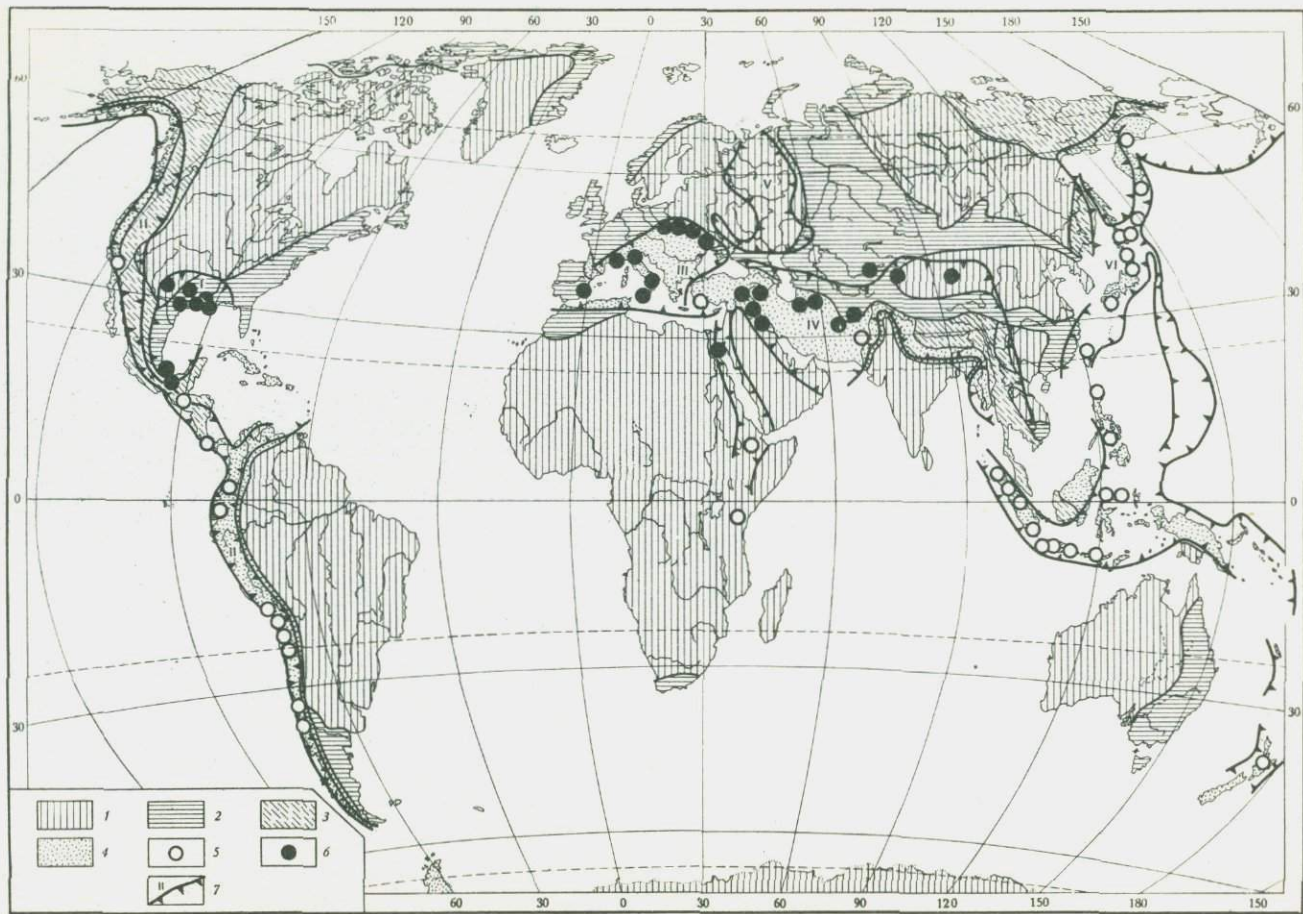
Вопросы систематизации сероносных площадей кроме автора рассмотрены также Н.П. Юшкиным (1968а, б).

Не останавливаясь на всех этих подразделениях сероносных провинций, отметим здесь лишь некоторые из них, наиболее интересные – новые бассейны, районы и месторождения.

В провинции Мексиканского залива находятся классические месторождения серы солянокупольного типа, уже более столетия известные на побережье штатов Луизианы и Техаса. В последние 15–20 лет месторождения этого типа выявлены также в акватории Мексиканского залива и в Мексике – на перешейке Теуантепек. Эти открытия подтвердили представление о монотипности серных месторождений рассматриваемой провинции. Американские геологи мало обращали внимания на перспективы сероносности широких полей галогенных формаций, развитых по соседству, и прежде всего на пермский соленосный бассейн в Западном Техасе, где уже давно имелись находки серы.

Новые данные вносят существенные изменения в представления о типе серных месторождения провинции Мексиканского залива. В последние годы в Западном Техасе, в округе Кальберсон, околонурупный, почти 100-километровой протяженности сероносный район Раствлер Спрингс, а на востоке его центральной части, вблизи г. Форт Стоктоун пять лет назад детально разведано месторождение с запасами серы около 80 млн. т. Сейчас на нем уже работает фрэшевская установка, которая в дальнейшем может стать одной из крупнейших в США. Месторождение это линзовидно-пластообразное (Davis, Kirkland, 1970). Оно характеризуется полным сходством, с одной стороны, с расположенными по соседству солянокупольными месторождениями Техаса, а с другой стороны, – с пластообразными залежами типа предкарпатских, иракских и др. Оно приурочено к мощной нормально-осадочной сульфатной толще верхнепермской формации Кастайль (Castile Formation) и образовано сероносными известняками с содержанием 20–25% серы. По простиранию залежей известняки переходят в сульфатные породы и нередко, как и в Предкарпатском бассейне, окаймляются известняками, не содержащими серы. Широко проявлена нефтеносность и установлена полная аналогия изотопного состава углерода ( $C^{12}/C^{13}$ ) в нефти и известняках.

Месторождение Стоктоун является промежуточным, связывающим солянокупольные и пластообразные залежи в один генетический тип. Их генетическая однотипность давно уже была обоснована автором (Соколов, 1958), но многими это воспринималось с большими сомнениями.



ями ввиду довольно резких внешних различий месторождений. Разведанным месторождением Стоктоун далеко не ограничиваются перспективы сероносного бассейна Западного Техаса. Здесь уже известны и другие залежи серы и несомненно будут открыты новые.

В провинции Мексиканского залива выделяются три сероносных бассейна: Техасо-Луизианский и Теуантелекский бассейны солянокупольных месторождений и Западно-Техасский бассейн пластообразных залежей. Запасы серы в последнем бассейне, по-видимому, одного порядка с бассейнами солянокупольных месторождений.

В исключительно обширной по протяженности Кордильерской сероносной провинции концентрация вулканогенных месторождений серы намечается в четырех районах: 1) на севере Чили и соседних областях Перу и Боливии; 2) вдоль побережья Эквадора и Колумбии; 3) в странах Центральной Америки - Гватемале, Коста-Рике (месторождение Агуас-Саркас с запасами 11 млн. т); 4) в штате Калифорния, США. Интересно отметить, что на западе США имеются вулканогенные месторождения серы, в частности Левиафан и Иерингтон, которые еще недавно выдерживали при эксплуатации конкуренцию даже с французской серой (Thompson, MacAskill, 1955).

Не менее обширна и другая провинция вулканогенных месторождений серы - Восточно-Азиатская. В ее пределах можно выделить три сероносные области, где сконцентрированы многочисленные месторождения.

1. Курило-Камчатская область.

2. Северо-Японская область, охватывающая о. Хоккайдо и северную часть Хонсю - главного острова Японского архипелага. Здесь известно большое число месторождений серы, однако крупные залежи гидротермально-метасоматического типа с запасами в несколько миллионов или даже десятков миллионов тонн насчитываются единицами. Среди них самое крупное - это серносульфидное месторождение Мацуо с запасами 32 млн. т самородной серы и 48 млн. т серы в сульфидах.

Дешевая рабочая сила обеспечивает в Японии кустарную разработку также и мелких месторождений фумарольного типа. Однако в последние годы в Японии наметился заметный спад добычи самородной серы, вытесняемой главным образом попутной серой из нефтеочистительных масс. Производство такой серы, вероятно, скоро приблизится к 1 млн. т в год. Стоимость 1 т попутной серы в Японии 40 долларов, а серы с рудников - 56-63 доллара.

---

Карта сероносных провинций и главнейших месторождений самородной серы (составили А.С. Соколов и М.Д. Капитонов)

1-4 - области складчатости: 1 - докембрийской, 2 - палеозойской (каледониды и герциниды), 3 - мезозойской, 4 - кайнозойской; 5, 6 - месторождения самородной серы: 5 - вулканогенные, 6 - экзогенные; 7 - сероносные провинции: I - Мексиканского залива, II - Кордильерская, III - Средиземноморская, IV - Среднеазиатская, V - Восточно-Европейская, VI - Восточно-Азиатская

3. Индонезийская сероносная область. Еще сравнительно недавно о геологии серных месторождений Индонезии было известно очень мало, но после работы в этих районах советских геологов (А.С. Соколов, В.М. Никольский, Г.Т. Саксеев и др.) мы располагаем весьма подробными сведениями. Подавляющее большинство этих месторождений относится к фумарольному типу выполнения; имеется ряд месторождений кратерно-озерного типа, в том числе весьма крупное для этого типа месторождение Телага Бодас с запасами серы около 1 млн. т. Наконец, некоторые месторождения Индонезии могут рассматриваться как гидротермально-метасоматические, наиболее перспективные из вулканогенных месторождений.

В последние годы новые довольно крупные, по-видимому гидротермально-метасоматические, месторождения серы выявлены и подготавливаются к эксплуатации на Филиппинах и Новой Зеландии. На Филиппинах на о. Негрос изучено месторождение Памплона, представленное несколькими залежами с общими запасами руды в 60 млн. т, в том числе достоверных 20-25 млн. т руды при содержании серы 25-26%. Намечается добыча 600-700 тыс. т руды в год. На Новой Зеландии в центре Северного острова в районе оз. Ротокава вблизи Таупо буровыми скважинами разведано вулканогенное месторождение серы с запасами до 6 млн. т. Содержание серы в руде в среднем 20%; изучается экономика разработки этого месторождения.

На приведенной карте (см. рисунок) в районе Новой Зеландии границы Восточно-Азиатской провинции остались открытыми в южном направлении. Интересно отметить, что на продолжении этих границ в Антарктике у берегов Земли Виктория имеется вулканическая зона, где наблюдались единственные в своем роде замерзшие фумаролы. Здесь на о. Росса возвышается на высоте 4023 м над уровнем моря огромный конус действующего вулкана Эребус. На нем один над другим расположены четыре кратера, один из которых действующий, с постоянным выделением паров и газов и периодическими выбросами вулканических материалов и излияниями лавы. По описанию Е. Шеклтона (Shackleton, 1909), здесь наблюдались многочисленные холмики льда с пожелтением, представляющие замерзшие фумаролы - образования, нигде пока не встреченные.

В пределах Средиземноморской провинции довольно отчетливо выделяются два хорошо известных сероносных бассейна: Предкарпатский, начинающийся у границы Чехословакии с Польшей и протягивающийся через Южную Польшу, советское Предкарпатье и уходящий в пределы Румынии, и Сицило-Аппенинский, или Итальянский.

Значительно меньшими ресурсами серы и перспективами характеризуются Южно-Французский и Испанский сероносные районы. Недостаточно еще изучены Албано-Югославский, а также Крымский районы; во втором в последнее время сделаны новые находки серы.

Исключительно обширна, но весьма слабо еще изучена Среднеазиатская сероносная провинция, в зарубежной части которой пока известен только один крупный сероносный бассейн - Месопотамский; центром его является известное месторождение Мишрак в Ираке. В последние годы для его освоения привлечены польские специалисты. Месторожде-

ние будет эксплуатироваться методом Фраша; в настоящее время завершено строительство первой очереди установки на 250 тыс. т серы в год; в дальнейшем намечается увеличение добычи до 1 млн. т в год. Кроме Мишрака в Ираке имеются и другие пока еще недостаточно изученные месторождения (Эль-Фатха и др.). Вероятно, сероносные площади переходят из Ирака в соседнюю Сирию, перспективы сероносности которой в последние годы изучали И.И. Алексенко, М. Мунзер и др.

В зарубежной части Среднеазиатской провинции, вероятно, много перспективных районов. Здесь расположено своеобразное месторождение Рас Гемза, описанное Г.А. Шнельманом (Schnellman, 1959) как типично инфильтрационно-метасоматическое. Есть указания о наличии крупного месторождения серы в Иордании. На юго-западе Турции также в неогеновых отложениях в зоне выходов сероводородных источников известно и эксплуатируется (18 тыс. т серы в год) месторождение Кечиборлу с запасами до 0,5 млн. т руды, содержащей до 60% серы.

В советской части Среднеазиатской провинции наиболее перспективен Гаурдак-Кугитангский район; весьма интересно Предкавказье и ряд сероносных районов с мелкими месторождениями — Западно-Туркменский, Каракумский, Ферганский, Южно-Туркменский и Южно-Таджикский (некоторым из них посвящены специальные статьи настоящего сборника).

Восточно-Европейская провинция здесь не описывается, ей посвящена статья А.И. Отрешко и О.Т. Степаненко в этом сборнике. Отметим только, что кроме давно известного и изученного Средневожского бассейна большой интерес представляют районы Пермского Приуралья, Башкирии и особенно Южного или Актюбинского Приуралья, где в самое последнее время выявлено интересное Подгорненское месторождение. Оно приурочено к карбонатно-сульфатной толще кунгура, к своду антиклинальной структуры. Осернение развито в известняках на контакте с гипсами и частично в последних. Сероносная залежь весьма невыдержанная; на глубине 150-300 м мощность ее от 1 до 15 м при содержании серы 10-20%, прослежена она на несколько километров. По наблюдениям Б.С. Рякина, месторождение относится к инфильтрационно-метасоматическому типу и если это подтвердится, то можно ожидать здесь значительных запасов. Рядом имеются и другие перспективные структуры (Жилианская, Белогорская и др.).

Обширные перспективные на серу площади имеются в Восточной Сибири. Прогнозно-ревизионными работами, проведенными ГИГХСом совместно с сибирскими геологами (Антипов, Животягин, 1969), здесь зафиксировано большое число серопроявлений в кембрии, составлены обзорные прогнозные карты, предпринимались поисковые работы, но пока безуспешно. Вероятно, дальнейшими работами на этой обширной перспективной территории будут выявлены месторождения серы и здесь будет выделена еще одна крупная сероносная провинция.

## Генетические и промышленные типы месторождений самородной серы

Проблема генезиса всегда находилась в центре внимания геологов, исследующих месторождения серы, и решение ее всегда расценивалось как средство раскрытия и познания законов размещения залежей серы, а следовательно и путей их прогноза, поисков и разведок, что в конце концов является главной задачей геологоразведочного дела.

Генезис серы – проблема сложная, прежде всего вследствие огромного многообразия геолого–геохимических условий образования серы в самородном виде. Чтобы разобраться в этом многообразии, необходима классификация генетических типов месторождений и проявлений самородной серы.

Попытка подобной классификации месторождений серы уже сделана (Соколов, 1972), и нет необходимости останавливаться на ней подробно. В основу ее положена общая схема генетической классификации месторождений полезных ископаемых, которая в наиболее общепризнанном виде дана в работах П.М. Татарина (1963) и В.И. Смирнова (1969).

Классификация подтверждает огромное многообразие генетических проявлений серы. Так, самородная сера образуется при вулканогенных и гидротермальных процессах, встречается в осадках современных озер и др. Особенно многообразна подгруппа серных месторождений выветривания; здесь мы встречаемся с остаточными месторождениями, известны даже находки серы обломочного типа, но особенно многочислен и разнообразен класс инфильтрационных месторождений. Практически почти все месторождения экзогенной группы, показанные на карте (см. рисунок), относятся к инфильтрационным, главным образом к подклассу разложения сульфатов осадочных пород.

Для выявления перспектив поисков и разведок на серу очень важно среди всего этого многообразия генетических проявлений серы выделить промышленные типы месторождений, т.е. такие, которые согласно определениям В.М. Крейтера (1940) и В.И. Смирнова (1957) рекомендовали себя как основные поставщики данного вида минерального сырья для промышленности.

По данным В.М. Крейтера (1960), промышленным считается такой тип месторождений, который дает не менее 1–3% мировой добычи данного полезного ископаемого. Этому определению отвечают только два типа месторождений серы: метасоматические по сульфатным породам из группы экзогенных и гидротермально–метасоматические из класса вулканогенных. Промышленные скопления серы, во многих странах даже эксплуатируемые, представляют собой также месторождения типа замещения (Шорсу, Чангырташ и др.), кратерно–озерные и выполения из класса вулканогенных. Однако запасы этих месторождений и масштабы добычи на них столь невелики, что к основным промышленным типам их причислять нельзя.

Главное значение в мировой серной промышленности имеют метасоматические месторождения по сульфатным породам: на них падает более 80% мировых запасов. По литолого–структурным и другим осо-

бенностям месторождения этого типа условно подразделяются на три подтипа:

1) залежи в кепроках соляных куполов – это месторождения штатов Техас и Луизиана в США, а также Мексики, о которых уже говорилось выше. Их главная отличительная особенность – то, что продуцирующие серу сульфаты имеют остаточное кепроковое происхождение;

2) сероносные залежи, связанные со сплошными толщами сульфатных пород нормального осадочного происхождения. Сюда относятся месторождения Предкарпатья (советского и польского), месторождение Мишрак (Ирак), некоторые месторождения Сицилии, Гаурдакское и др. По запасам серы это главный подтип, он дает около 40% мировых запасов, но по продукции серы он пока еще уступает первому подтипу. Однако в связи с освоением метода Фраша месторождения второго подтипа в ближайшем времени и по продукции серы приблизятся, а затем и превзойдут месторождения солянокупольного подтипа;

3) сероносные залежи в толщах переслаивающихся сульфатных и карбонатных пород. Они отличаются меньшими мощностями залежей, большим числом их в разрезе и значительно худшими в силу этого условиями эксплуатации как горно-технологическими, так и особенно геотехнологическими способами. Гипс-ангидриты, метасоматически преобразующиеся в серу и кальцит, нередко образуют не сплошные пласты, а лишь гнезда, линзы и пропластки среди карбонатных, обычно доломитовых пачек и тогда серные руды оказываются сильно разубоженными первичным доломитом. Примером этого подтипа являются средневожские месторождения.

Несмотря на весьма существенные внешние отличия месторождений этих трех подтипов, генетически они совершенно однотипны и все образуются путем метасоматического преобразования сульфатов в сернокальцитовые руды под воздействием углеводородов.

Очень близки к ним по геологическому строению, условиям нахождения и образования месторождения типа замещения сульфатных и карбонатных пород, примером которых является месторождение Шорсу. По данным Н.П. Юшкина (1968а), серообразующий процесс здесь двухступенчатый – сначала происходит растворение сульфатных включений и прослоев, а позднее, с разрывом во времени – заполнение образующихся пустот серно-кальцитовой рудой, причем кальцит здесь обычно совершенно другого облика. Этот процесс нельзя назвать метасоматическим и такие месторождения условно относятся к типу замещения.

В очень многих и в том числе сравнительно недавних работах по геологии серы большинство крупнейших месторождений (предкарпатские, средневожские, а несколько раньше Гаурдакское и даже Чангырташское и Каракумские) относились к классу осадочных седиментационных месторождений. Они отождествлялись с современными накоплениями серы в некоторых озерах, и образование их рисовалось по классической схеме гипотезы сингенеза" путем микробиологического восстановления растворенных в водах бассейна сульфатов до сероводорода, окисления последнего до серы и накопления ее в донных карбонатных илах (Данов, 1936; Иванов, 1964).



Действительно, в Киренаикских озерах Ливии, в Серном озере г. Серноводска, а также в кратерных озерах вулканических областей отлагаются сероносные илы, но во всех этих случаях сероводород поступает в них извне. Известны также многочисленные примеры бассейнов, продуцирующих значительные количества сероводорода (Черное море и др.), но в этих случаях накопления сероносных илов не происходит. По-видимому, совмещение в одном бассейне резко противоположных биохимических процессов — сульфатредукции и окисления сероводорода — невозможно, а следовательно и образование месторождений серы по "классической схеме гипотезы сингенеза" нереально.

Установление в последние годы не осадочной, а метасоматической природы сероносных известняков Гаурдака, Предкарпатья и других месторождений этого типа и продолжающееся накопление многих других геологических фактов окончательно развенчало гипотезу осадочно-седиментационного образования применительно к отмеченным месторождениям серы.

### **Закономерности строения и размещения месторождений серы и проблема их прогноза**

Одной из главных проблем современной геологии является установление закономерностей образования и размещения полезных ископаемых. В геологии серы этой проблемой занимаются многие исследователи и можно считать, что для главного промышленного типа инфильтрационно-метасоматических месторождений серы общие закономерности их строения и размещения в значительной мере выявлены.

Установлена стратиграфо-литологическая приуроченность их к га-логенным сульфатным формациям. Определены структурно-тектонические условия их образования и локализации: приуроченность сероносных бассейнов и районов к зонам сочленения поднятий и прогибов, размещение рудных полей и месторождений в антиклинальных и купольных структурах и связь сероносных залежей с разрывными нарушениями, зонами дробления, трещиноватости и вообще с тектонически ослабленными участками как дизъюнктивных, так и пликвативных дислокаций.

Установлена приуроченность серообразования к структурам с ослабленными покровными, а также тяготение серных месторождений к бортам древних долин размывов. Возрастание мощности и непроницаемости покровов ведет к затуханию накоплений серы; значительный размыв покровов также неблагоприятен, так как тогда серные залежи разрушаются.

Подмечена роль неотектонических движений, активизирующих условия, благоприятные для серообразования; проанализировано значение амплитуды этих движений. Установлены пространственная и генетическая связь месторождений серы с углеводородами, их обязательное размещение в нефтегазоносных районах и повсеместное нахождение тех или иных проявлений углеводородов непосредственно на серных месторождениях. Выяснены основные гидрогеохимические условия серообразования, создающиеся в зоне взаимодействия сульфатных вод с глу-

бинными щелочноземельно-натриевыми рассолами, несущими углеводороды, в обстановке относительной раскрытости структур и выхода глубинных вод к поверхности. Получила полное подтверждение указанная еще А.С. Уклонским роль сероводородных вод как консерваторов залежей серы.

На основе этих и ряда других закономерностей строения и размещения месторождений серы, широко освещенных в литературе, разработаны главнейшие геологические предпосылки для поисков серы. Установлены также многие поисковые признаки на серу (выходы сероносных пород и ореолы рассеяния – первичные и вторичные, зона окисления серных залежей, геоморфологические, геофизические, биологические, топонимические признаки и др.).

Комплекс этих поисковых критериев обеспечил составление большого количества обзорных и мелкомасштабных, а частично и средне-масштабных прогнозных карт сероносности и достаточно надежные выделения на территории СССР основных перспективных на серу областей и районов. Однако попытки развернуть в новых районах поисковые работы столкнулись с большими трудностями. Практически оказалось почти невозможно сузить выделенные перспективные площади и конкретизировать поисковые работы в таких, например, районах, как Иркутский амфитеатр, Башкирия и другие районы Предуралья, Днепровско-Донецкая впадина и т.п. Это в свою очередь повлекло за собой уменьшение объемов поисковых работ, без которых новых месторождений не откроешь.

Для существенного повышения эффективности поисковых работ актуальнейшей задачей геологии серы является крупномасштабный прогноз, причем ориентированный главным образом на слепые закрытые залежи, в том числе находящиеся на сравнительно больших глубинах, измеряющихся уже не десятками, а сотнями и даже первыми тысячами метров.

Необходимой теоретической основой крупномасштабного прогноза является дальнейшая углубленная разработка и конкретизация, с одной стороны, вышеотмеченных общих закономерностей строения и размещения сероносных залежей, а с другой – установление локальных закономерностей, обусловленных специфическими особенностями конкретных районов и площадей, определение на этой основе новых поисковых критериев и практических приемов крупномасштабного прогноза. Решение этой проблемы требует значительного расширения набора поисковых критериев, разработки и применения новых методов поиска серы, прежде всего геофизических и геохимических.

Следует заметить, что если в детализации и раскрытии некоторых закономерностей локализации серных залежей (таких, например, как структурно-тектонических) мы имеем определенные сдвиги, то многие другие закономерности остаются все еще недостаточно выясненными. Так, мы только в самом общем виде представляем литологическую приуроченность серных залежей к сульфатоносным толщам и пока еще не умеем определять перспективы сероносности по характеру этих толщ. Интересные работы в указанном направлении проведены в последние годы А.И. Отрешко и О.Т. Степаненко (1968), установивших понятия

о сероносных комплексах и зонах. Однако эти исследования основаны на изучении разрезов или совсем лишенных серы, или несущих ее в сильно рассеянном виде. Поэтому трудно сказать, следует ли рассценивать подобную рассеянную серную минерализацию, являющуюся в основном продуктом окисления сероводорода, как положительный признак для поисков серы или же она, наоборот, должна служить индикатором условий, неблагоприятных для развития метасоматических процессов и накопления серы до промышленных концентраций.

Очень медленно развиваются исследования гидрогеохимических закономерностей образования и размещения серных месторождений. Идея связи серных залежей с зонами взаимодействия сульфатных вод и глубинных рассолов, обоснованная А.С. Уклонским, а затем А.С. Соколовым, хотя и признается многими геологами, дальнейшего развития практически не получила.

Очень мало работ по детализации и углубленному раскрытию, связи серных месторождений с углеводородами как в геологическом и чисто пространственном аспекте, так и в отношении выяснения качественных особенностей углеводородов, продуцирующих и сопровождающих серные залежи.

Необходимо глубже разобраться с интересной закономерностью связи некоторых месторождений с долинами размыва. Что это – просто частный случай раскрытости структур, благоприятных для серообразования, или же связь с долинами имеется на всех месторождениях, в том числе и в Предкарпатье, провинции Максиканского залива и других, где пока такие долины не установлены.

В последние годы у нас несколько активизировалось применение геофизики при поисках серы (Горбачев, 1969), однако явно недостаточно – необходимо дальнейшее развитие этого метода.

Следует широко использовать геохимические методы, которые, вероятно, несут огромные резервы повышения эффективности поисковых работ. В этом отношении интересен разработанный Г.М. Вдовиченко потенциометрический метод, позволяющий путем сравнительно простых и недорогостоящих измерений  $E_h$ , pH и других величин в припочвенном слое давать прогнозную оценку и даже оконтуривать предполагаемые сероносные залежи на глубине до нескольких сотен метров. Наметились реальные возможности изотопного метода поисков, заключающегося в выявлении аномальных (по изотопному составу серы и углерода) сульфатов и карбонатов.

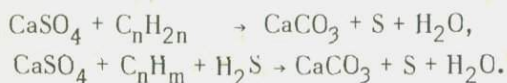
Разработка теоретических основ и практических приемов крупномасштабного прогнозирования, а также применение новых, прежде всего геофизических и геохимических, методов поисков серы – одна из главных проблем геологии серы.

### **Теория инфильтрационно-метасоматического образования главнейших месторождений серы**

Накопление большого количества новых данных по геологии месторождений серы, резко увеличившихся в связи с расширением геолого-разведочных работ, а также вскрытием и даже полной отработкой горными работами целых залежей и очень крупных участков серных ме-

сторождений, применение новых очень тонких геохимических методов, глубокий анализ всего этого обильного фактического материала привели к существенному развитию и все более широкому признанию теории инфильтрационно-метасоматического происхождения основных экзогенных месторождений серы. Эта теория в настоящее время убедительно обоснована и продолжает получать все новые подтверждения при детальном исследовании, разведке и эксплуатации Гаурдакского и многих предкарпатских месторождений.

При соответствующих геолого-геохимических условиях, возникающих на разных глубинах (вероятно от нескольких десятков до первых тысяч метров), сульфатные породы в условиях воздействия углеводородов, возможно также и сероводорода, вступают с ними в химическое взаимодействие. Последнее неизбежно прежде всего потому, что геохимически эти соединения резко противоположны. Первые являются крайне окисленными, а вторые, наоборот, резко восстановленными. Продуктами этого взаимодействия являются сера и кальцит, причем реакции протекают в следующем виде:



Геологические, минералого-петрографические и другие наблюдения отчетливо свидетельствуют, что указанный процесс имеет характер метасоматического преобразования сульфатной породы в серно-кальцитовую.

Огромным преимуществом этой теории генезиса серных залежей в сравнении с многочисленными другими является то, что только она позволила полно и ясно истолковать все те закономерности строения и размещения месторождений серы, о которых говорилось выше и которые в значительной мере были установлены эмпирически. Теория инфильтрационно-метасоматического происхождения серных месторождений позволила существенно детализировать эти закономерности и конкретизировать вытекающие из них поисковые критерии.

Только эта теория дала ясное понимание главной литологической закономерности размещения серных месторождений – их строгой приуроченности к толщам сульфатных пород, постоянному контактированию серно-кальцитовых залежей с сульфатами, наблюдаемым взаимопереходом между ними, которые невозможно толковать как первичные фациальные изменения.

При помощи этой теории удалось объяснить чисто кальцитовый состав серных руд и исключительное постоянство среднего содержания серы на всех главнейших месторождениях (в %): на Гаурдакском – 24,5, Роздольском – 25,5, Язовском – 25, новом Загайпольском – 24, Тарнобжегском – 25,5, Сицилийском – 23, Мишрак – 23,4, Ра-стлер Спринг – 20–25. Такое же содержание серы характерно и для солянокупольных месторождений. Образуюсь за счет преобразования сульфатных пород, серно-кальцитовые руды унаследовали и сохранили содержание серы, присущее сульфату кальция.

Рассматриваемая теория убедительно раскрыла сущность структурно-тектонической локализации серных залежей, постоянно и закономерно связанных с тектонически ослабленными зонами дизъюнктивных и пликативных дислокаций, осуществлявших необходимую тектоническую подготовку для преобразования сульфатов. Это установлено и сейчас никем уже не опровергается для месторождений Гаурдак и Шорсу. Интереснейшие работы Г.Т.Саксеева, В.Ф. Полкунова и других убедительно доказывают структурно-тектонический контроль осернения на месторождениях Предкарпатья. На средневожских месторождениях, к сожалению, подобных специальных исследований не проводилось, но, очевидно, и здесь тектонический контроль играет решающую роль в образовании и размещении серных залежей.

Одна из наиболее давно подмеченных особенностей серных месторождений – их пространственная связь с углеводородами. Теория метасоматоза раскрыла ее генетическую сущность, которая подтверждена многочисленными анализами изотопного состава, показавшими исключительное сходство соотношения  $C^{12}/C^{13}$ , "легкий" изотопный состав углерода сероносных известняков и сопутствующих им углеводородов, чем они резко отличаются от более "тяжелого" углерода морских осадочных карбонатов. Эти особенности изотопного состава карбонатов открыли путь новому геохимическому методу поисков серных месторождений, который сейчас успешно разрабатывается.

В настоящее время, кроме изотопного состава, есть очень много других доказательств метасоматической природы сероносных известняков, которые еще недавно относились (например в Предкарпатья) к седиментационным образованиям. Эта ошибка свидетельствует о несовершенстве и недостаточности обычных литолого-петрографических приемов исследований для решения литогенетических вопросов. В связи с этим, естественно, возникают сомнения в правильности генетической трактовки и многих других, в том числе и несероносных карбонатных пород. В.И.Вернадский (1917) давно обращал внимание на возможное образование счень многих так называемых вонючих известняков в результате преобразования гипсов.

Инфильтрационно-метасоматическая теория позволила существенно конкретизировать многие поисковые критерии, сузить поисковые площади и обеспечить надежный прогноз и успешное выявление новых сероносных участков и месторождений: V и Узункудукский сероносные участки на Гаурдаке, Загайпольское и Тейсаровское месторождения в Предкарпатья и др.

В то же время еще многие геологические факторы серообразования остаются невыясненными. Так, пока не известно, при каких условиях в Предкарпатья наряду с обычными надгипсовыми сероносными известняками появляются также и подгипсовые залежи. А ведь это имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение, так как в очень близком будущем подгипсовые и внутригипсовые залежи могут стать одним из главных объектов поисков серы в Предкарпатья.

Характеризуя теорию инфильтрационно-метасоматического происхождения серных залежей, приходится, к сожалению, отметить, что ее геохимическая сущность, механизм и агенты процессов серообразования по-

лучили пока только самое общее и весьма предварительное истолкование. Специальных и прежде всего экспериментальных исследований этих важных вопросов не проводилось и это, конечно, большой недостаток проделанных работ, который необходимо исправить в ближайшее время.

Интересная попытка разобраться с механизмом процессов метасоматического преобразования гипс-ангидритов в серные руды была предпринята И.С. Лазаревым. Согласно теории Д.С. Коржинского растворение старых минералов и образование новых происходит почти одновременно, и порода при этом все время сохраняет твердое состояние. Тогда представляемое некоторыми геологами (Н.П. Юшкиным для Шорсу) двухступенчатое течение процесса замещения гипс-ангидритов серой и кальцитом не может быть названо метасоматозом, т.е. такое замещение не может привести к образованию столь четких серно-кальцитовых псевдоморфоз по гипсу с сохранением даже внутренней структуры кристаллов, какие наблюдаются на многих месторождениях.

Метасоматический процесс сернорудного образования протекает по данным Д.С. Коржинского в объемах поровых растворов. Рассмотрев эти тонкие процессы минералогенеза на примере Гаурдакского месторождения, И.С. Лазарев обстоятельно разобрал основные условия и факторы, обуславливающие их развитие как в дорудный этап, так и в собственно рудный этап серообразования. Необходимыми условиями для этого, по его мнению, являются наличие гипс-ангидритов, их структурно-тектоническая подготовка, инфильтрация в них углеводородов.

До сих пор большое число вопросов об условиях метасоматического преобразования гипс-ангидритов в серно-кальцитовые руды остается нерешенным и даже не рассмотренным. Так, пока не выяснено, протекает ли этот процесс под воздействием только углеводородов и каких, или же здесь участвует также сероводород, привносимый в зону серообразования извне.

На очень многих месторождениях серы среди выделений углеводородов преобладает метан — химически и биохимически наименее активный углеводород. В то же время залежи сероводородсодержащих горючих газов, которые можно рассматривать как геохимические аналоги серных месторождений, относятся к газоконденсатному типу и характеризуются повышенным содержанием высших и гораздо более активных гомологов метана.

Для решения вопроса о привносе в зоны серообразования сероводорода необходимо тщательно изучить баланс серы и других элементов в процессе метасоматоза. Н.П. Юшкин провел соответствующие расчеты баланса вещества для месторождения Шорсу. Расчеты атомных количеств показали, что серы сульфатов гипсовых пластов не хватает, и 25-45% ее привнесено сероотлагающими растворами<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Месторождение Шорсу — неблагоприятный объект для подобных исследований, а на более простых по минеральному составу месторождениях Предкарпатья и Гаурдак такие работы не проводились, хотя именно здесь можно ожидать более полноценных и интересных результатов.

Более чем 50-летнюю давность имеет вопрос об участии кислорода сульфатов в окислении углеводородов, впервые рассмотренный известным геохимиком Г. Бергом (Berg, 1917). В широко известной работе Х. Фили и Дж. Калпа (Feely, Kulp, 1957) образование серы объяснялось взаимодействием сульфата и сероводорода



Но недавно Дж. Девис и другие (Davis, Kirkland, 1970), специально исследовавшие этот вопрос, снова отвергли возможность такой реакции. Они считают, что окисляющим агентом был кислород и что глубина образования самородной серы определяется уровнем проникновения содержащих его вод. В соответствии с этим перспективными на серу соляными куполами они считают только те, в кепроках которых циркулируют грунтовые воды. Близкие выводы мы находим для Гаурдакского месторождения в работах М.С. Гуревича и других исследователей.

Таким образом, вопрос о глубине процессов серообразования и о роли в нем свободного кислорода и микроорганизмов остается открытым.

Следует выяснить и природу процесса редукции сульфатов. В.И. Вернадский считал, что этот процесс может быть биохимическим, а может быть и частично химическим. "Гипс и углеводороды в областях земной коры с более высокой температурой — 50°C и выше, в среде, бедной свободным кислородом, совместно неустойчивы, входят в химическую реакцию" (Вернадский, 1927, стр. 22). Горячим сторонником возможности abiогенного течения этой реакции был А.С. Уклонский. С.М. Григорьеву (1954) удалось экспериментально осуществить чисто химическое взаимодействие сульфатов с метаном в условиях температур и давлений, близких к тем, которые предполагаются в зонах серообразования. Но до сих пор, к сожалению, никто даже не попытался хотя бы повторить эксперимент, не говоря уж о необходимости значительного развития этих исследований.

Теория инфильтрационно-метасоматического происхождения серных месторождений стала сейчас наиболее общепризнанной и действенной у геологов-производственников, и ликвидация создавшегося отставания в раскрытии ее геохимической сущности, процессов и агентов серообразования, является одной из важнейших проблем геологии серы.

### **Роль сероводородсодержащих горючих газов для развития серной промышленности**

В последние годы определился новый очень мощный источник получения элементарной серы — сероводородсодержащие горючие газы. Франция, которая 15–20 лет назад в основном импортировала серу, с открытием месторождения Лак, а затем и других месторождений сернистых горючих газов и с освоением методов утилизации из них серы, теперь не только полностью покрывает свою потребность, но и стала весьма крупным экспортером серы.

Еще в больших масштабах добывается сера из сернистых горючих газов в Канаде, где эксплуатируется около двух десятков таких месторождений, дающих уже свыше 3 млн. т серы в год. В настоящее время Канада — самый крупный в мире экспортер серы. Извлекаемые запасы серы в Канаде превысили 100 млн. т и продолжают увеличиваться, несмотря на их интенсивную эксплуатацию.

В истекшем пятилетии аналогичные месторождения горючих газов с высоким содержанием сероводорода выявлены и в Советском Союзе: сначала в Амударьинском нефтегазоносном бассейне (месторождения Уртабулак, Самантепе, Учкыр, Мубарек, Адамташ и другие), а совсем недавно также вблизи Оренбурга, где запасы газов особенно значительны. Эти месторождения привлекают к себе все большее внимание не только промышленных организаций, но и исследователей самородной серы, прежде всего вследствие своих геологических особенностей.

Так, установлена интересная тождественность месторождений сернистых газов Амударьинского нефтегазоносного бассейна по стратиграфо-литологическим, структурно-тектоническим и ряду других особенностей — с Гаурдакским месторождением самородной серы.

Очевидно, в купольно-антиклинальных структурах верхнеюрской карбонатно-сульфатно-соляной формации в условиях надежной изоляции под мощными покрытиями соленосных и сульфатных пород создаются благоприятные условия для накопления горючих газов, богатых сероводородом. В условиях же раскрытия такие структуры могут явиться ареной инфльтрационно-метасоматического преобразования сульфатов в мощные серно-кальцитовые залежи.

Надо полагать, что построение структурно-литологической карты для всей огромной площади распространения верхнеюрской формации с отражением глубинных и других тектонических разломов, различных условий изоляции и других факторов позволило бы наметить перспективные площади по газоносности и по самородной сере.

В специальных статьях настоящего сборника дана характеристика месторождений сернистых горючих газов. Некоторые присущие им закономерности отмечаются ниже. Главной закономерностью сернистых горючих газов и сернистых нефтей является их связь с карбонатными коллекторами мощных карбонатно-сульфатных формаций. Накопление значительных количеств таких газов требует надежной изоляции под непроницаемыми толщами, какими могут быть сульфатно-соленосные образования. Высокие концентрации сероводорода ассоциируют с залежами жирных газов газоконденсатного типа с повышенным содержанием газорастворенной нефти с высокомолекулярными углеводородами, высшими гомологами метана. Последние отличаются высокой активностью к процессом сульфатредукции, что обуславливает высокие концентрации в газах кислых компонентов (более 5–15% в сумме). Однако нет достаточных оснований считать весь сероводород этих залежей продуктом сульфатредукции, протекающей как в самой структуре, так и в соответствующих бассейнах седиментации, воды и газы которых могли быть захоронены. Вероятно, та или иная часть накапливающегося сероводорода имеет глубинное, возможно даже ювенильное происхождение.

Еще недавно повышенное содержание сероводорода и вообще сернистых соединений в углеводородах рассматривалось как весьма отрицательный показатель при их промышленной оценке. В настоящее время можно уже говорить о специальных поисках высокосернистых горючих газов, представляющих мощный источник получения серы.

Дальнейшее уточнение отмеченных и установление новых закономерностей образования и размещения залежей сероводородсодержащих горючих газов, а также переход к специальным поискам таких месторождений вырисовываются сейчас как новая специфическая проблема геохимии серы.

Соотношения месторождений самородной серы и сернистых горючих газов еще более подтверждают замечательные идеи А.С. Уклонского о парагенезисе серы и углеводородов, открывают новые пути решения генезиса серы и требуют особенно детального изучения геохимии серы не только в гипергенных, но и в глубинных зонах.

### Проблема геохимии серы

В проблеме геохимии серы один из важных вопросов – выяснение общих законов распределения и миграции серы в общем цикле геологических процессов и в различных геосферах Земли.

Уже изначально определилось неравномерное распределение серы в геосферах Земли. В центральной геосфере (сидеросфере) концентрация серы весьма незначительная. В средней геосфере (халькосфере, сульфидно-окисной) сконцентрированы наибольшие количества серы, представленной преимущественно моносulfидом железа ( $FeS$  – троилит) и сульфидами различных металлов. Наконец, во внешней геосфере (литосфере) концентрация и распределение серы характеризуются значительной неравномерностью: в эклогитовом поясе литосферы концентрация серы невелика, а в самой внешней оболочке – земной коре – сера содержится в заметных количествах и играет очень важную роль во многих процессах. Особенно велика роль серы в осадочных породах, где ее содержание (0,3%) на порядок выше, чем в породах изверженных (0,01–0,04%).

В цикле геологических процессов поведение серы весьма сложное. Она существует в различных модификациях, проявляется в разнообразных минеральных формах и образует весьма неравномерные концентрации. В глубинных эндогенных процессах сера проявляется почти исключительно в виде сульфидов металлов. Первые ее значительные накопления фиксируются еще в магматическую стадию, когда ликвидация сульфидов приводит к образованию крупных скоплений пирротина и железо–никель–медистых малосернистых сульфидов среди пород основного состава (нориты, габбро). Эти скопления представляют собой важный источник не только металлов, но и серного сырья.

В пегматитовой и глубинно-пневматолитовой стадиях сера почти не участвует и в соответствующих минералообразованиях содержится в очень малых количествах. Стадия гидротермальной деятельности, наоборот, характеризуется весьма активным участием серы и образованием сульфидных месторождений различных металлов, образуются также сульфаты.

Особенно крупные концентрации серы связаны с колчеданными месторождениями, являющимися мощным источником серного сырья. Генезис этих месторождений до сих пор дискуссионен, большинство геологов считают их вулканогенно-осадочными. Еще более спорен генезис телетермальных, в особенности стратиформных, главным образом свинцово-цинковых месторождений. Для исследователей серных месторождений, в частности Гаурдакского, проблема телетермальных месторождений особенно интересна, так как к ним относятся свинцовые руды Кугитанга и гаурдакские флюорит-баритовые жилы, а также недавно выявленное в овраге Карача цинковое оруденение.

Подобные телетермальные образования известны в связи с самородной серой не только в Гаурдак-Кугитангском районе. Вероятно, это продукты деятельности подземных вод глубокой циркуляции, постоянно встречающихся на серных месторождениях и часто известных под названием "нефтяные воды". Это хлоридные щелочноземельно-натриевые рассолы, обычно бессульфатные, с высоким содержанием щелочных земель и не только кальция, но и стронция, и бария. Они богаты бором, фтором, кремнекислотой, имеют температуру до 100–150°C и внешне очень сходны с ювенильными гидротермами.

Исключительно велика роль серы в стадии вулканизма, когда происходит огромный вынос ее к поверхности и фиксация в виде залежей сульфидов, алунитов, а также самородной серы.

В.В. Щербина (1972) установил, что вследствие всегда более высокой плотности окислов металлов по сравнению с сульфидами последние в глубоких зонах переходят в окислы с высвобождением огромных количеств серы, выносящейся к поверхности. Из 0,03–0,05% (370 г/т) серы, содержащейся в земной коре, около 60–70% приходится на серу сульфидную, причем 20–40% ее связано с тяжелыми металлами, а 60–80% – с железом. Интересно, что только 0,5% общего количества железа в земной коре входит в состав сульфидов, а резко преобладающее его количество образует окислы.

Самым распространенным сульфидом железа является пирит, однако при высоких температурах (выше 500–600°C) он неустойчив и переходит в пирротин. Вероятно, в глубинных зонах земной коры идет направленный геохимический процесс перехода пиритов в пирротин по схеме:  $FeS_2 \rightarrow FeS + S$ .

При этом высвобождается огромное количество серы, которое вытесняется из глубинных зон коры.

Однако и пирротин, и сульфиды других металлов в глубинных зонах земной коры геохимически неустойчивы. Плотность сульфидов металлов всегда меньше плотности окислов этих металлов (в г/см<sup>3</sup>):

Сульфиды металлов		Окислы металлов	
Пирит ( $FeS_2$ )	–4,9–5,2	Иоцит ( $FeO$ )	–5,945
Марказит ( $FeS_2$ )	–4,85–4,9	Гематит ( $Fe_2O_3$ )	–5,26
Пирротин ( $Fe_{1-x}S$ )	–4,6–4,7	Магнетит ( $Fe_3O_4$ )	–4,8–5,3
Халькозин ( $Cu_2S$ )	–5,5–5,8	Куприт ( $Cu_2O$ )	–5,8–6,2

## Сульфиды металлов

## Оксиды металлов

Ковеллин (CuS)	-4,6-4,7	Тенорит (CuO)	-5,8-6,4
Галенит (PbS)	-7,4-7,6	Глет (PbO)	-9,14
		Массикот (PbO)	-9,56
Алабандин (MnS)	-3,9-4,1	Манганозит (MnO)	-5,18-5,36
		Пирролюзит (MnO <sub>2</sub> )	-5,04-5,08
Сфалерит (ZnS)	-3,9-4,1	Цинкит (ZnO)	-5,64-5,68
Миллерит (NiS)	-5,2-5,6	Бунзенит (NiO)	-6,4-6,9

Примечание: Данные взяты из справочника "Минералы". М., Изд-во АН СССР, 1953.

В связи с этим в глубинных зонах с высоким давлением, где идет общая перегруппировка элементов в минералы с наиболее плотной упаковкой, сульфиды металлов переходят в их окислы с высвобождением огромных количеств серы, вытесняемой к поверхности. Здесь она соединяется с кислородом и образует очень крупные накопления растворенных и твердых сульфатов, а также связанных с ними месторождений самородной серы.

Указанный процесс выноса серы из глубинных зон земной коры в зону гипергенеза, конечно, гипотетичен и требует дополнительного обоснования и доказательств. Но как бы ни был решен этот вопрос, явление постоянного выноса огромных количеств серы из глубинных зон к поверхности отмечалось авторами при наблюдениях проявлений вулканизма.

Если даже какая-то часть вулканической серы является производной от возможного засасывания вулканическими аппаратами богатой сульфатами морской воды, то другая (большая или меньшая) часть вулканической серы является ювенильной.

Этот общий геохимический процесс вытеснения серы к поверхности протекает также и в экзогенных условиях. Он, например, четко фиксируется в подземных водах. На глубине, особенно в мощных осадочных толщах, всегда присутствуют бессульфатные рассолы. Все гипотезы формирования этих рассолов признают вторичность процесса обессульфативания с перемещением продуцированного сероводорода к поверхности.

Процесс сульфатредукции на глубине чисто химический, а в более высоких зонах также и биохимический; существенно интенсифицируется он в областях распространения углеводородов. Но одним из необходимых условий формирования и накопления последних является их изоляция под мощными непроницаемыми крышками. В таких условиях в карбонатных, обычно сульфатоносных коллекторах продуцируемый сероводород не выносится, а накапливается, образуя, в частности, залежи сернистых нефтей и сероводородсодержащих горючих газов.

С этой схемой хорошо увязываются интересные высказывания итальянского геолога Р. Гуальтьери (Gualtieri, 1959), считающего, что не содержащие серу известняки верхней зоны кепроков соляных куполов образовывались на больших глубинах в крайне восстановительных условиях, где вследствие нехватки кислорода они насыщались не серой, а сероводородом. С продвижением же штока соли и венчающего его кепрока к поверхности, восстановительные условия ослабевают и из сульфатов образовывались кальцит и сера, занимающие в кепроках более низкое положение — под неосерненными известняками.

Все изложенное представляет лишь фрагментарные и только весьма общие положения, с помощью которых показана необходимость более широкого и углубленного изучения геохимии серы.

Перед геологией серы стоят трудные задачи поисков новых месторождений и участков прежде всего для наиболее прогрессивного метода добычи серы подземной выплавкой. Это уводит поисковые и разведочные работы на большие глубины, сильно осложняет их. Эффективность этих работ будет зависеть от того, насколько научно обоснованно они будут направлены.

#### Литература

- Антипов Б.Д., Животягин Н.М. Перспективы поисков серы на юге Иркутского амфитеатра. — В сб.: Геология месторождения самородной серы. М., "Недра", 1969.
- Вернадский В.И. О сероводороде в известняках и доломитах. — Изв. Российской АН, 6-я серия, т. 11, № 16, 1917.
- Вернадский В.И. История минералов земной коры. Т. 1, вып. 2. Л., Госиздат, 1927.
- Власов Г.М. О Тихоокеанском сероносном поясе. — Сов. геол., 1969, № 7.
- Григорьев С.М. О процессах образования и свойствах горючих ископаемых. М., Академиздат, 1954.
- Горбачев М.Г. Перспективы применения геофизических методов при поисках серы. — Разв. и охрана недр., 1969, № 9.
- Данов А.В. Об условиях образования месторождений серы в Средней Азии. — Труды ЦНИГРИ, вып. 88, 1936.
- Иванов М.В. Роль микробиологических процессов в генезисе месторождений самородной серы. М., "Недра", 1964.
- Крейтер В.М. Поиски и разведки полезных ископаемых. М.—Л., Госгеолиздат, 1940.
- Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых, ч. I. Изд. 2-е. М., Госгеолтехиздат, 1960.
- Отрешко А.И., Степаненко О.Т. Перспективы сероносности Западной Башкирии. — Труды Геол. ин-та, вып. 20, Казань, 1968.
- Смирнов В.И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. Изд. 2-е. Изд. МГУ, 1957.
- Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. Изд. 2-е. М., "Недра", 1969.
- Соколов А.С. Серые месторождения и их разработка. Раздел в кн.: Менковский М.А. Природная сера. Госхимиздат, 1949.
- Соколов А.С. Основные закономерности геологического строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. — Сов. геол., 1958, № 5.
- Соколов А.С. Геологические закономерности строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. — Труды ГИГХСа, вып. 5, 1959.
- Соколов А.С. Генетическая классификация месторождений самородной серы. — В сб.: Геохимия и минералогия серы. М., "Наука", 1972.

- Татаринов П.М. Условия образования месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. Изд. 2-е. М., Госгеолтехиздат, 1963.
- Щербина В.В. Геохимия сульфидной серы. — В сб.: Геохимия и минералогия серы. М., "Наука", 1972.
- Юшкин Н.П. Принципы классификации, размещения и структурные особенности сероносных территорий. Труды Геол. ин-та, вып. 20, Казань, 1968а.
- Юшкин Н.П. Минералогия и парагенезис самородной серы в экзогенных месторождениях. Л., "Наука", 1968б.
- Berg G.Z. Zur Bildung von Schwefel im Gips. — Z. für praktische Geologie, H.11/12; 1917.
- Davis J.B., Kirkland D.W. Native sulfur deposition in the Castile formation, Culbertson county, Texas. — Economic Geology, v. 65, N 2, 1970.
- Feely H.W., Kulp J.L. Origin of Gulf-Coast salt-dome sulfur deposits. — Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, v. 41, N 8, 1957.
- Gualtieri R. Sulla formazione di minerale solfifero o di calcarea rocce solfatiche. L'Industria mineraria, ser. II, Anno 10, N 4, 1959.
- Shackleton E. The heart of the Antarctic. London, 1909.
- Schnellman G.A. Formation of sulfur by reduction of anhydrite at Ras Gamsa, Egypt. — Econom. Geol., v. 54, N 5, 1959.
- Thompson R.B., MacAskill D. Anaconda's Verington Plant Demonstrates Economical Recovery of Sulfur from Low-Grade Ore. — Chemical Engineering Progress, v. 51, N 8, 1955.

## К ГЕНЕЗИСУ САМОРОДНОЙ СЕРЫ

Впервые основные положения теории парагенезиса серы и нефти были разработаны одним из авторов (Уклонский, 1928). Согласно этой теории самородная сера является продуктом окисления сероводорода, генетически связанного с нефтью. Сероводород, попадая в кислородную среду, окисляется до элементарной серы. Вместе с серой при смешении щелочных нефтяных вод с поверхностными выпадает ряд своеобразных минералов: целестин, барит, халцедон, опал, флюорит и др. Таким образом, все месторождения серы молоды и возникли за счет эпигенетических процессов, связанных с разрушением нефтяных месторождений.

Прошло более 40 лет после опубликования теории парагенезиса. За этот немалый срок в Советском Союзе и за рубежом открыты многие нефтегазоносные провинции, на территории которых известны месторождения серы, серопроявления или сероводородные источники. К их числу относятся Бухаро-Хивинская, Афгано-Таджикская, Каракумская, Волго-Уральская, Днепрово-Донецкая, Предкарпатская и ряд других, за рубежом — провинции Франции, Канады, Сицилии, Северной Африки, Ирака и др. Сейчас парагенетическая связь серы и нефти общепризнана.

Одно из важнейших достижений геологии серных месторождений — установление приуроченности скоплений серы исключительно к карбонатно-сульфатным толщам нефтегазоносных провинций. Большая заслуга принадлежит в этом вопросе А.С. Соколову, обобщившему обширный материал по геологии серных месторождений и впервые разработавшему комплекс конкретных геологических предпосылок для поисков месторождений самородной серы (Соколов, 1956, 1958). Большинство современных исследователей серных месторождений — И.И. Алексенко, Д.П. Бобровник, М.Г. Горбачев, Н.М. Даценко, М.В. Иванов, В.Д. Коган, Е.К. Лазаренко, А.И. Отрешко, А.С. Соколов, Б.И. Сребродольский, Н.П. Юшкин и другие — сходятся на признании важной роли палеогеографического, гидрогеологического, микробиологического, тектонического и неотектонического факторов, а также связанных с последним эрозионных процессов, в формировании серных залежей.

Значительная роль отводится сероводороду. Однако вопрос происхождения сероводорода в сероносных карбонатно-сульфатных толщах оказался запутанным. Существует множество гипотез и точек зрения о происхождении сероводорода на серных месторождениях. Две главные из них принципиально противоположны: 1) сероводород на серных месторождениях — продукт сульфатредукции гипса (ангидрита); 2) сероводород попадает на серные месторождения вместе с нефтью.

За последние годы в ряде стран и в СССР в том числе в карбонатных и карбонатно-сульфатных породах были открыты десятки промышленных газонефтяных месторождений с аномально высоким содержанием сероводорода. Все эти месторождения представляют собой геологически закрытые структуры с глубиной залегания до 5–6 км и более, с горя-

чими высокоминерализованными всдами (от 60 до 140°C и выше), где роль современных микроорганизмов и поверхностных вод практически сводится к минимуму. Сероводород же является постоянным компонентом этих газовых месторождений и содержится нередко в огромных количествах. Так, на месторождениях Бухаро-Хивинской нефтегазоносной провинции среднее содержание сероводорода в продуктивных горизонтах карбонатной юры составляет (в %): на Уртабулаке - 5, Денгизкуле - 5,04, Мехеджане - 3,8, Хаузаке - 3,92, Самантепе - 2,85, Учкыре - 1,7 и т.д.

Учитывая, что запасы углеводородов достигают на крупнейших месторождениях сотен и тысяч миллиардов кубических метров, а запасы сероводородных нефтяных вод практически неисчерпаемы, можно предположить, что общие запасы сероводорода в отдельных нефтегазоносных провинциях исчисляются миллиардами тонн. В связи с этим проблема происхождения сероводорода становится особенно актуальной. Что это за сероводород? Связан ли он с сероводородом серных месторождений или они генетически разобщены?

В настоящее время накоплен материал, позволяющий полнее осветить вопрос происхождения сероводорода.

Необходимо провести сравнительный литологический анализ рудовмещающих горизонтов и их аналогов в условиях нефтяного и газового месторождения, изолированного надежным экраном, разрушающегося месторождения нефти и газа и генетически с ним связанного месторождения серы, и, наконец, разрушающегося или полностью разрушенного серного месторождения. Подобные примеры эволюции месторождений известны во многих сероносных провинциях. В Средней Азии они изучены в Бухаро-Хивинской нефтегазоносной провинции и в юго-западных отрогах Гиссарского хребта с известными здесь месторождениями газа (Уртабулак, Самантепе и др.) и серы (Гаурдак).

Палеогеографические построения для юрских отложений Средней Азии, к которым относятся сероносные толщи Гаурдака, сделанные одним из авторов (Троицкий, 1967), позволили расшифровать историю зарождения и эволюции как газонефтяных, так и серных месторождений. И в Гаурдаке, и в таких газонефтяных месторождениях с сероводородным заражением, как Уртабулак, Денгизкуль, Хаузак, Адамташ и других, продуктивные горизонты одни и те же. Как показал палеофациальный анализ, все они формировались в сходных палеогеографических условиях единого верхнеюрского морского и солеродного бассейна. Таким образом, в прошлом вплоть до неогена в их развитии было больше сходства, чем различий.

В истории развития позднеюрских седиментационных бассейнов выделяются два этапа: келловей-оксфордский и кимеридж-раннетитонский. В первый этап образовались мощные карбонатные формации, сложенные известняками различного генезиса (оолитовые, детритусовые, рифогенные, водорослевые и др.) с преобладанием высокопроницаемых известняков-коллекторов. Второй этап привел к формированию галогенных формаций. Петрографическое изучение разрезов газонефтяных месторождений, проведенное авторами, показало, что на всех закрытых структурах карбонатные породы подвержены существенным эпигенетическим изменениям.

По степени эпигенетической изменчивости пород и структурным особенностям изученные месторождения были подразделены на три типа: уртабулакский, адамташский, кульбешкакский.

Наиболее распространен уртабулакский тип. К нему относится большая часть газонефтяных месторождений, в том числе Уртабулак, Денгикуль, Самантепе, Хаузак, Кандым, Аккум. Сюда же можно отнести Гаурдак, Тюбегатан и ряд других геологически открытых структур. Продуктивные горизонты имеют, как правило, двучленное строение. Нижняя часть их представлена плотными известняками, интенсивно пропитанными сероводородом и нефтяными битумами и выщелоченными в той или иной степени. Преобладает коричневатый цвет различных оттенков. Вторичная минерализация незначительна, достигает 15–20% и представлена в основном кальцитом и доломитом. Верхняя часть на 75–95% сложена ангидритами с густой сеткой битумов и включениями известняка.

Адамташский тип отличается по строению верхней части продуктивных горизонтов, которая сложена неравномерно-пятнистой, сильно трещиноватой карбонатно-сульфатной породой с примерно равным количеством известняка и ангидрита. В нижней части карбонатно-сульфатной толщи порода часто имеет вид тектонической брекчии с остроугольными обломками известняка, сцементированными крупнокристаллическим ангидритом. Мощность этой зоны на Адамташе 30–40 м. К этому типу месторождений относятся также Гумбулак, Мабики, Караиль и др.

На первом и втором типах месторождений наблюдается переходная пачка сильно выщелоченных, рыхлых и зачастую обеленных пород, известная в литературе под названием "рухляков". Она прослеживается на значительной территории и служит своеобразной границей, где меняется минеральный состав пород и, в частности, резко снижается содержание ангидрита.

Кульбешкакский тип встречается главным образом на тех месторождениях, где карбонатные и галогенные формации представлены значительно сокращенными разрезами и часто содержат примесь терригенного материала. Резкого разделения карбонатно-сульфатных и карбонатных пород не наблюдается. Вторичная минерализация незначительная, в основном это ангидрит, доломит и кальцит. К этому типу относятся месторождения Даяхатын, Азляртепе, Сарыча, Узбеккудук и др.

Чтобы выяснить условия распределения сероводорода в продуктивных горизонтах, его генетическую сущность, взаимоотношение с другими минералами и нефтяными битумами, были выделены петрографические типы сульфатных и карбонатно-сульфатных пород. На изученных месторождениях в зависимости от количественного содержания ангидрита выделяют следующие типы: ангидриты (более 70%  $\text{CaSO}_4$ ); смешанные карбонатно-сульфатные породы; известняки с примесью ангидрита (до 10%); песчаники, алевролиты, глины и прочие породы с примесью ангидрита.

Ангидриты встречаются в основном на месторождениях уртабулаковского типа, где ими сложено до 60–70% всех сульфатных пород, причем на долю чистого ангидрита приходится около 5–7%. Наиболее распространены среди ангидритов древовидные, нематобластовые и таблит-

чато-массивные структуры, между которыми существуют переходные разности.

В древовидных структурах пелитоморфный известняк, пропитанный нефтяными битумами, в виде полос, а также ветвистых и перистых образований слагает основной контур рисунка структуры и этому контуру подчинены ангидритовые выделения, обычно представленные призматически-удлиненными, таблитчатыми и веерообразными зернами. Структура подчеркивается не только битумами, но иногда и незначительной (до 1-2%) примесью глинистого материала.

Нематобластовые структуры ангидритов обычно также подчинены выделениям известняка, отражая и повторяя его распределение в породе. Известняк, как правило, сохранился в реликтовых структурах в виде петель, пятен, паукообразных выделений и полос. Довольно часто известняк наблюдается в комковатых разностях в виде скоплений комочков, сцементированных ангидритом.

Таблитчато-массивные структуры ангидрита представлены изометрическими табличками, которые выделяются по крупности зерен (от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров). Однородный крупнотаблитчатый ангидрит встречается довольно редко; чаще всего это смесь таблитчатого и призматического ангидрита.

Смешанные карбонатно-сульфатные породы преобладают в адамташском типе, хотя на месторождениях Уртабулак, Ходжи, Кандым, Аккум и других ими сложено до 20-25% сульфатных пород. Для них характерны гнездовидные, брекчиевидные и сетчатые (петельчатые) структуры.

В гнездовидных структурах известняк обычно представлен комковатой и афанитовой разностями и, как правило, пропитан битумами. Ангидрит образует в известняке многочисленные гнезда, пятна и вкрапления размером от долей миллиметра до нескольких сантиметров. В гнездах ангидрит тонкопризматический с нематобластовой структурой.

Брекчиевидные структуры - это обычно сильно трещиноватый микробрекчированный известняк, интенсивно пропитанный нефтяными битумами и сцементированный ангидритом. Ангидрит обнаружен в виде отдельных длиннопризматических лейст, небольших линз и выделений неправильной формы.

Сетчатые (петельчатые) структуры чрезвычайно распространены. Пелитоморфный известняк, пропитанный, как правило, битумами, образует причудливые петли, заполненные ангидритом. Ангидрит имеет вид призматически-удлиненных и радиально-лучистых зерен, причем зерна его расположены так, что они повторяют конфигурацию карбонатных петель с постепенным укрупнением размеров по мере удаления от контакта.

Особенностью всех структур является наложенный характер ангидритовой минерализации с ярко выраженными чертами метасоматоза. Границы известняка и ангидрита иногда четкие, определены полостями или трещинами, но чаще расплывчатые. В микробрекчированных структурах замещению подвергаются отдельные обломки известняка, метасоматоз идет путем его постепенного разъедания и поглощения. В конечном счете от известняка остаются микроскопические пятна и полосы.

Очень характерно ведет себя доломит. Это постоянный спутник битуминозного известняка, реже ангидрита. Иногда зерна ангидрита обра-

зуют пойкилобластовую структуру за счет многочисленных включений ромбэдров доломита. Доломит обычно скапливается в трещинах в известняке — там же, где и битумы, или вокруг ступков с битумами, образуя мелкую рассеянную вкрапленность в известняке; чаще его выделения наблюдаются по контакту известняка и ангидрита. Содержание доломита иногда довольно значительное, до 40—50% (доломит-ангидритовые породы). Он скапливается в местах растворения пелитоморфного битуминозного известняка, как бы продолжая петли, пятна и полосы известняка и образуя своеобразные ажурные узоры, цепочки и беспорядочные скопления зерен.

Аналогично доломиту ведет себя пирит, который постоянно в небольших количествах присутствует в известняке. В единичных случаях его содержание повышается до 7—10%.

В описанных породах в выделении минералов можно проследить четкую зональность: пелитоморфный кальцит, пропитанный нефтяными битумами, → доломит с незначительным содержанием битумов → ангидрит, свободный от битумов. Зональность проявляется не только в пространстве, но и во времени. Выделения ангидрита обычно наиболее поздние.

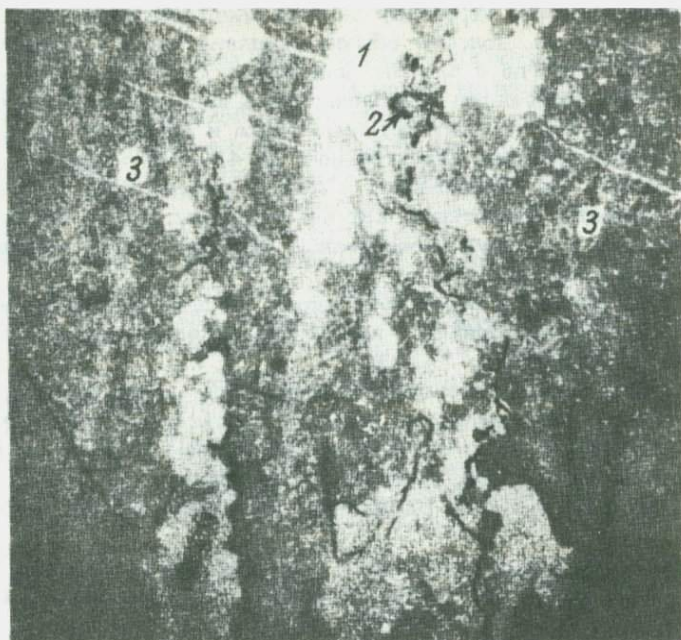
Следующий тип пород представлен известняками с примесью ангидрита (до 10%). Известняк часто совершенно неизменный. В виде линз, пятен и глыб он встречается в небольших количествах по всему разрезу карбонатно-сульфатной толщи с преобладанием его в нижней части на всех изученных месторождениях. Ангидрит в известняке имеет самую разнообразную форму выделений, большинство из которых уже встречалось в предыдущих типах, разница только в процентном содержании. Однако есть специфичные формы выделений — ангидрит в порфириобластах и выполняющий трещины.

Известняк обычно представлен афанитовой и комковатой разностями, плотный, слабо доломитизирован. Порфириобласты ангидрита таблитчатой или удлиненно-призматической формы равномерно рассеяны по всему известняку. Иногда они образуют кучные скопления или, сливаясь, создают гнезда (переход к гнездовидной структуре). Размер порфириобласта ангидрита от 1—2 до 3—4 мм, редко больше. Часто ангидрит выполняет секущие трещины в известняке или сопровождает трещины с битумами. Участками комковатый известняк в той или иной степени выщелочен.

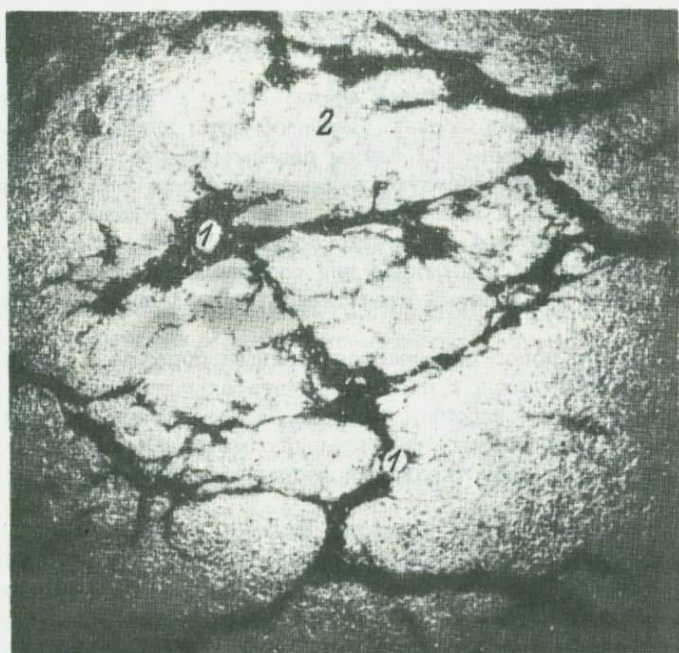
Четвертый тип пород встречается главным образом в кульбешкаком типе месторождений и в основных чертах повторяет уже описанные структурные особенности сульфатов. В известняке часто присутствует значительная примесь терригенного материала, иногда роль известняка выполняют известковистые песчаники, алевролиты и глины (фиг. 1, 2).

Изучение распределения нефтяных битумов и сероводорода в сульфатных и карбонатно-сульфатных породах и их взаимоотношения с минералами выявило три основных принципиально новых положения.

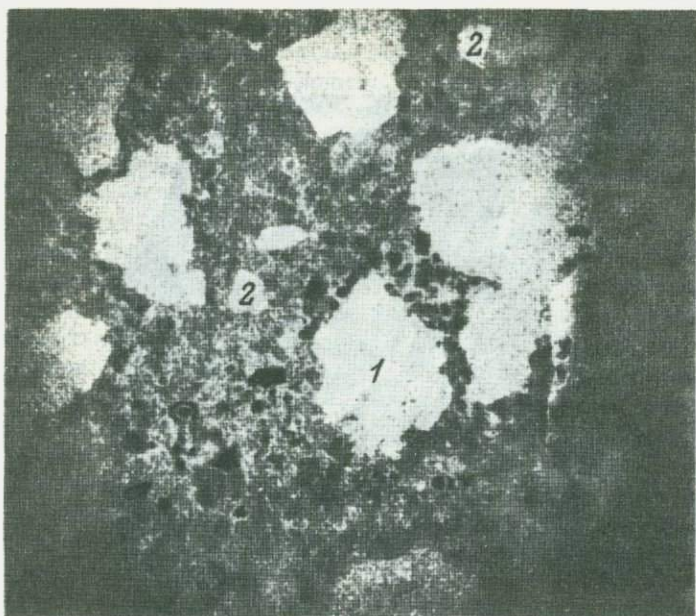
1. На всех изученных газонефтяных месторождениях в сульфатных и карбонатно-сульфатных породах четко проявлена дифференциация вещества: и сероводород, и нефтяные битумы сосредоточены исключительно в известняке.



a



6



в

Фиг. 1. Эпигенетические (наложенные) выделения ангидрита в известняк (а, б – месторождение Адамташ, в – Кандым)

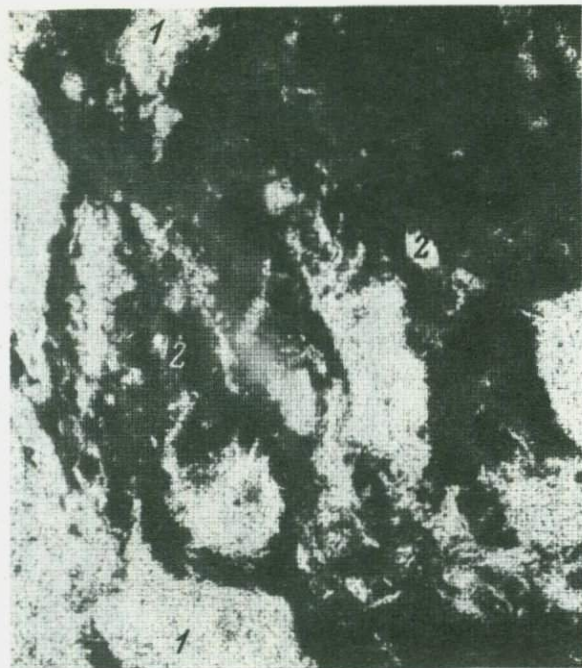
а – выделения ангидрита (1) вокруг прожилков битумов (2) в известняке (3), шлиф 200, увел. 30, без анализатора; б – сетчатая (петельчатая) структура, реликты известняка (1) в ангидрите (2), шлиф 239, увел. 72, без анализатора; в – порфириобласты ангидрита (1) в известняке (2), шлиф 496/18, увел. 30, без анализатора

2. С глубиной, вместе с увеличением количества известняка и нефтяных битумов, возрастает и содержание сероводорода, что особенно характерно для адамташского типа месторождений.

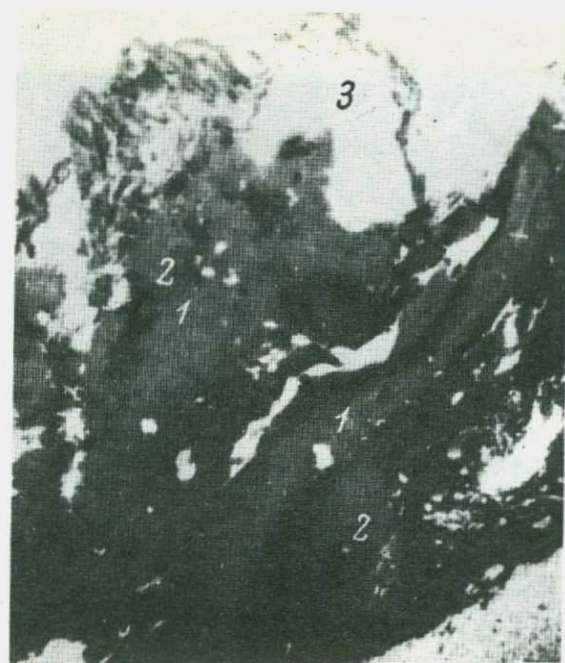
3. Следов разложения, выщелачивания или каких-либо других изменений сульфатов на контакте с битумами или вдали от контакта не обнаружено. Основная масса ангидрита – метасоматическое наложенное образование, не содержащее ни битумов, ни сероводорода.

Во всех описанных структурах наряду с вторичным метасоматическим ангидритом широко распространен и обычный хемогенный ангидрит, выпадающий из сульфатных рассолов до накопления галита. Как показали химические и спектральные анализы мономинеральных проб, этот ангидрит отличается от метасоматического содержанием примесей.

Таким образом, существует две основные генерации ангидрита: седиментационный и метасоматический ангидрит. Первый ни с битумами, ни с сероводородом генетически не связан, поэтому на его описании останавливаться не будем.



а



б

Фиг. 2. Метасоматическое замещение известняка ангидритом

а - ангидрит (1), замещающий известняк (2), месторождение Уртабулак, шлиф 602/11, увел. 72, без анализатора; б - реликты известняка (1), пропитанные нефтяными битумами (2), замещенные метасоматическим ангидритом (3), месторождение Адамташ, шлиф 177, увел. 160, без анализатора

В образовании метасоматического ангидрита решающую роль приобретает контакт трех составляющих: карбонатная порода → нефтяные воды → газы. Все структурные особенности сульфатных и карбонатно-сульфатных пород заставляют предположить, что на границе между карбонатными и галогенными формациями под воздействием нефтяных вод и газов происходят мощные процессы эпигенеза, существенно меняющие поровое пространство и минеральный состав пород.

Все процессы эпигенеза, протекающие в карбонатных формациях в положительных нефтегазоносных структурах, можно подразделить на два типа: 1) процессы, связанные с изменением первичного порового пространства и химическим выщелачиванием известняков; 2) процессы, связанные с трещинной тектоникой, в том числе с микротектоникой.

Основные стадии развития эпигенеза, связанного с трещинной тектоникой, следующие: а) образование и раскрытие трещин и пустот; б) миграция по трещинам нефтяных вод и газов; в) выполнение трещин нефтяными битумами и вторичными минералами, одновременно с растворением и преобразованием околотрещинного пространства. С последней стадией тесно связан процесс метасоматического замещения известняков ангидритами, приводящий к формированию смешанных карбонатно-сульфатных пород, содержащих углеводороды и сероводород.

Таким образом, применение теории парагенетической связи серы и нефти к месторождениям сероводородных газов и углеводородов, расположенных в закрытых структурах на больших глубинах, позволило по-новому осветить вопрос происхождения карбонатно-сульфатных пород.

Изучение особенностей развития нефтегазоносных артезианских бассейнов показывает, что они формировались в условиях гидравлически изолированных систем при затрудненном водообмене. Большинство бассейнов в течение мезозоя и палеогена (вплоть до среднего миоцена) характеризовались элизионным водообменом, связанным с процессом отжатия седиментационных бескислородных высокоминерализованных вод в пласты-коллекторы. При этом движение вод оказывалось соизмеримым с геологическим временем. Незначительные превышения областей питания и их удаленность от центральных частей впадин существенно затрудняли водообмен, ограничивая внедрение кислородных инфильтрационных вод только краевыми частями бассейнов.

Начиная со среднего миоцена и особенно в четвертичное время (в связи с постплатформенным орогенезом) гидродинамика бассейнов перестраивается. В недрах депрессий и вблизи поверхности возникают благоприятные условия гидравлической связи между отдельными водоносными комплексами. В эту эпоху особенно интенсивно развиваются процессы эпигенеза. В запечатанных структурах в карбонатных формациях они приводят к сульфатному метасоматозу с образованием смешанных карбонатно-сульфатных пород. Это первый этап эпигенетического преобразования нефтеносных карбонатных формаций.

Пока нельзя однозначно ответить на вопрос о путях миграции сероводорода в положительные структуры. Но по характеру его распределения в известняках карбонатных формаций можно предположить, что наряду с латеральной миграцией существует и вертикальная миграция. Не исключено и наличие седиментационного подтока глубинного фреа-

тического сероводорода. Ясно, что сероводород на газонефтяных месторождениях очень тесно пространственно связан с нефтяными газами, битумами и водами, и вопрос его генезиса и миграции нельзя отрывать от вопроса генезиса и миграции нефти.

Второй этап эпигенеза — этап серообразования в карбонатно-сульфатных и карбонатных толщах открытых и полуоткрытых нефтегазоносных структур. В юго-западных отрогах Гиссара и на прилегающих площадях он начался с общего подъема территории в древнечетвертичное время. С возникновением крупных горных сооружений водоносные горизонты нефтегазоносных карбонатных формаций, в том числе и карбонатно-сульфатные породы, в ряде мест оказались выведенными на дневную поверхность, а иногда и приподнятыми на высоту нескольких тысяч метров. Формации подверглись складчатости и дроблению. С этого момента отмечается интенсивная проработка кислородсодержащими инфильтрационными водами открытых нефтеносных структур, окисление сероводорода до элементарной серы, перетложение и перекристаллизация ее и выпадение вместе с серой, при смешении нефтяных вод с поверхностными, парагенных сере минералов: целестина, арагонита, вторичного кальцита, халцедона, барита, рудных и других, т.е. того комплекса минералов, на который в свое время указывал один из авторов (Уклонский, 1940).

Серопроявления в первую очередь контролируются тектоническим фактором и, как показано на примере Гаурдака, могут встречаться на значительной глубине — до 700–800 м и более. Однако в большинстве раскрытых структур юго-западных отрогов Гиссарского хребта в карбонатно-сульфатных породах встречены лишь незначительные проявления серы прожилково-вкрапленного типа в трещинах. Промышленные скопления наблюдаются только в Гаурдаке.

В чем здесь дело? Все структуры формировались в сходной палеогеографической обстановке, во всех структурах с избытком есть сульфаты, углеводороды, есть и гидрогеологическая раскрытость, инфильтрационные воды, богатые кислородом, разломы, микроорганизмы (видимо одинаковые), а серы нет. Очевидно, всех перечисленных факторов еще недостаточно для образования промышленных скоплений серы.

Странники метасоматического замещения серой гипса считают, что достаточно подвести к гипсу (ангидриту) углеводороды в сухом виде (Сахаров, 1947) или вместе с соленой водой (Юшкин, 1968), как тут же начнется растворение гипса и замещение его серой.

Трудно представить, что нефтяные воды, заключенные в карбонатно-сульфатных толщах не один миллион лет, вдруг в силу каких-то причин стали агрессивными и начали выщелачивать, растворять и восстанавливать сульфат. Это не логично и не подтверждается данными изучения газонефтяных месторождений. Поэтому мы подчеркиваем, что на закрытых газонефтяных месторождениях метасоматические ангидриты карбонатно-сульфатных толщ — эпигенетическое молодое образование, повсеместно сопровождающее нефтяные битумы, но в настоящее время, хотя в структурах есть и битумы, и сульфаты, процесс сульфатредукции за счет последних не идет.

Практически все наблюдаемые карбонатно-сульфатные толщи в той или иной степени битуминозны, поэтому, допуская метасоматоз серы по гипсу, мы должны допустить образование серы на месте огромных по масштабам распространения гипсоносных толщ при выходе сульфатов на поверхность. С одной стороны, это противоречит законам концентрации серных залежей, которые, как правило, наблюдаются в определенных участках нефтегазоносных бассейнов, сера же внутри карбонатно-сульфатных толщ тяготеет обычно к тектоническим нарушениям. С другой стороны, в тех участках карбонатно-сульфатных толщ, где наблюдается концентрация серы, ее больше, чем это может быть при образовании серы за счет гипса (23-24% объема породы).

Наличие крупных серных залежей предопределяет существование мощного подтока сероотлагающих растворов. И, несомненно, основная роль в отложении серы принадлежит сероводородным источникам.

В вопросе происхождения и питания сероводородных источников на серных месторождениях большой интерес представляют наблюдения И.И. Алексенко (1961, 1967) на месторождениях Предкарпатья. Видимо, современный гидродинамический режим вод и связанная с ним эрозия играют важную роль в формировании серных залежей и подтоке сероводорода. Бесспорно, что в образовании сероводорода принимают участие и бактерии, так как в поверхностных условиях только они способны переводить электроположительную серу сульфатов в электроотрицательную серу сероводорода. Но мы не можем согласиться с тем, что сероводород исключительно поверхностного происхождения и образуется, как предполагают И.И. Алексенко, М.В. Иванов и другие исследователи, только за счет сульфатредукции бактерий.

Гидрогеологические и гидродинамические исследования нефтеносных карбонатных формаций в юго-западных отрогах Гиссарского хребта показали, что разница между Гаурдаком и другими разрушающимися структурами состоит в том, что Гаурдак является местом разгрузки нефтяных вод. Вместе с нефтяными водами к Гаурдакскому разлому постоянно движутся новые порции сероводорода.

Таким образом, главным условием образования крупной серной залежи является непрерывный подток нефтяных вод, несущих сероводород. Как только закончится поступление сероводорода к месту разгрузки, закончится и формирование серного месторождения. Этим можно объяснить и то, что нефтеносные карбонатно-сульфатные толщи, приближаясь к поверхности, во многих открытых структурах интенсивно перерабатываются инфильтрационными водами, разрушение нефтяных залежей всегда сопровождается микробиологическими процессами, однако месторождения самородной серы встречаются только в строго определенных участках, там, где воды нефтегазоносных бассейнов разгружаются. Именно поэтому при прочих равных геологических условиях мы месторождение серы имеем в Гаурдаке, а не в Тюбегатане.

Следовательно, верхнеюрские нефтегазоносные карбонатные формации представляют неиссякаемую кладовую, которая поставляет основные запасы сероводорода на серные и на газонефтяные месторождения, т.е. и тот, и другой сероводород — генетически одно целое.

Третий этап эпигенеза в положительных нефтегазоносных структурах — это частичное или полное разрушение серного месторождения.

Самородная сера — крайне неустойчивый на поверхности минерал и сохраняется только в восстановительной обстановке (Уклонский, 1940). Изменение гидрохимического режима на серных месторождениях, связанное с различными факторами, в частности с резким поднятием структур и прекращением подтока нефтяных вод, приводит к перестройке гидродинамики месторождения с подавляющим господством инфильтрационных вод. Самородная сера в этих условиях окисляется и разрушается, в небольшой срок серное месторождение может полностью исчезнуть. Остатки такого разрушенного серного месторождения, поднятые на высоту около трех тысяч метров, с древними очагами разгрузки нефтяных вод, с травертинами, карстами и комплексом таких минералов, как арагонит, алузит, квасцы, халцедон, медная зелень и т.д., наблюдались авторами в юго-западных отрогах Гиссарского хребта в районе Байсунтау.

Таковы три основных этапа эпигенетических преобразований карбонатных формаций в положительных нефтегазоносных структурах. Нефтяные воды, несущие сероводород, метасоматические ангидриты карбонатно-сульфатных толщ и самородная сера с комплексом парагенных минералов в этих же толщах — звенья единой цепи.

Месторождения самородной серы образуются на месте разрушающихся нефтегазоносных залежей, заключенных в карбонатно-сульфатных и карбонатных толщах. Только сочетание комплекса определенных геологических условий, что наблюдается в природе довольно редко, приводит к концентрации промышленных скоплений самородной серы. Скопления серы следует искать в зоне разгрузки нефтяных вод, там, где нефтегазоносные складки раскрываются и имеется свободный выход сероводорода. Отсюда другое положение — месторождения нефти и газа надо искать в разновозрастных с вмещающими серу породах, т.е. в тех же карбонатно-сульфатных и карбонатных толщах, но там, где складки сохранились и не разрушены.

#### Литература

- Алексенко И.И. Условия формирования продуктивной толщи и закономерности размещения месторождений самородной серы в Предкарпатском бассейне. — Сов. геол., 1961, № 8.
- Алексенко И.И. Сера Предкарпатья. М., "Недра", 1967.
- Сахаров В.В. К вопросу о генезисе месторождений самородной серы в Шор-Су. ГИГХС, Технич. информ. № 1, 1947.
- Соколов А.С. Геологические закономерности размещения серных месторождений. — Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 31, вып. 3, 1956.
- Соколов А.С. Основные закономерности геологического строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. — Сов. геол., 1958, № 5.
- Троицкий В.И. Верхнетриасовые и юрские отложения Южного Узбекистана. Л., "Недра", 1967.
- Уклонский А.С. Месторождение Шор-Су. Ташкент, Изд-во Среднеаз. отд. Геол. ком., 1928.
- Уклонский А.С. Парагенезис серы и нефти. Ташкент. Изд. Узбекского филиала АН СССР, 1940.
- Юшкин Н.П. Минералогия и парагенезис самородной серы в экзогенных месторождениях. Л., "Наука", 1968.

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ СЕРНЫХ РУД

Оценка перспектив сероносности неразрывно связана с генетическими особенностями формирования месторождений серы. Выявленные геолого-гидрогеологические условия, механизм и химизм формирования серных руд Гаурдака являются, образно говоря, "классическими" для месторождений метасоматического типа. Что же является главным среди этих условий и каковы могут быть здесь вариации?

Первое условие — литологическая приуроченность серного оруденения, его связь с определенными продуктивными толщами. Это, во-первых, наличие материнских пород: пластов, линз ангидритов или гипсов мощностью от нескольких до десятков метров и более. Если материнская часть продуктивного разреза представлена карбонатно-сульфатными породами (частое их переслаивание или обильные включения известняков, доломитов, мергелей в сульфатных породах), то будут формироваться метасоматические серные руды более низкого качества, чем руды, образующиеся по более чистым разностям сульфатных пород. В качестве примера первых руд можно указать на руды горизонтов "I-R" и "к" месторождения Шорсу, руды залежи "D" Гаурдака и руды средневожских месторождений, в качестве примера более богатых руд — руды залежи "F" Гаурдака и месторождений Предкарпатья. Во-вторых, помимо сульфатных пород в разрезе продуктивной толщи должны быть породы со сравнительно хорошими коллекторскими свойствами. Например, известняки гиссарской свиты и горизонта "R" гаурдакской свиты на Гаурдаке, горизонт "I" в Шорсу, горизонт ратынских и литотамниевых известняков в Предкарпатья, барановские песчаники в Тарнобжеге (Польша). Сульфатные толщи, заключенные в каменных солях и глинах, не могут рассматриваться как продуктивные.

Второе условие — структурно-тектоническая приуроченность. В региональном плане — это связь с положительными структурами, к которым приурочены залежи углеводородов. В локальном отношении тектоника — это главный фактор в создании обычной и поровой скважности и водопроницаемости пород продуктивной толщи. Водоподводящими каналами могут быть крупные разрывные нарушения (например, Узункудукский разлом на Гаурдаке, Предкарпатский сброс, Калушский и Журавненский разломы в Предкарпатья), более мелкие разрывы и зоны дроблений (блоковая тектоника на Гаурдаке, разрывные нарушения в Шорсу), сами коллекторские пласты продуктивного разреза, дислоцированные трещинами и мелкими разрывами (ратынский горизонт в Роздоле, горизонт "R" в Гаурдаке). Основное здесь — это обычная, а главное поровая водонасыщенность сульфатных пород и достаточно длительное контактирование двух сред: серообразующие растворы — сульфаты.

В первом случае (канал-разрывы) этот контакт имеет не столько площадной, сколько линейный характер, что обуславливает жилообразную морфологию залежей серных руд (залежи "F" на Гаурдаке). Во втором

случае (канал — коллекторский пласт) контакт имеет площадной характер, что приводит к образованию пластообразных и линзовидных залежей (Раздол, Язов и др.). Между этими случаями могут быть различные вариации. Масштабы серного оруденения зависят от таких структурных факторов, как углы падения пород продуктивной толщи и положение рудоконтролирующих нарушений по отношению к структурным элементам поднятий; радиальные и субрадиальные разрывы менее благоприятны, чем концентрические и параллельные шарнирам поднятий.

Третье условие — это геоморфологические и палеогеоморфологические факторы, которые предопределяют образование эрозийного инфильтрационного окна в породах продуктивной толщи. При наличии небольшой покрывки из водонепроницаемых пород инфильтрационное окно может быть создано разрывными нарушениями, секущими продуктивную толщу и породы покрывки. Палеогеоморфологические условия предопределяют образование эрозийных врезов древней речной сети и связанный с этим местный гидродинамический режим. Последнее условие рассматривается как необязательное. На Гаурдаке оно проявилось образованием крупных залежей путем их наращивания снизу вверх по мере восстановления уровня подземных вод и миграции зоны серообразующих растворов. При отсутствии этого условия, вероятно, образовались бы залежи, на 2/3 меньшие по размерам, чем существующие.

Четвертое условие — формирование зоны серообразующих растворов. С момента выхода газонефтеносной структуры в зону гидрогенеза залежь углеводородов разрушается. Окисление последних ведет к увеличению растворенных органических веществ в законтурных подземных водах, а начавшийся водообмен может на той или иной глубине от границы гидродинамической зоны насыщения создать подзону затрудненного водообмена, в пределах которой происходит формирование серообразующих растворов. Интенсивное насыщение этими растворами сульфатных пород продуктивной толщи и их длительное контактирование могут привести к образованию залежей метасоматических серных руд. Важное значение имеет миграция зоны серообразующих растворов, которая происходит при смене не только местного базиса эрозии (Гаурдак, Роздол), но и регионального (Шорсу, средневожские и некоторые предкарпатские месторождения), а также при неотектонических подвижках.

Стадии минерализации, т.е. последовательность отложения парагенных сере минералов, могут варьировать. Как указывает Н.П. Юшкин, для Шорсу обычна следующая последовательность смены стадий во времени: серная — кальцитовая — серная; целестиновая всегда сменяет серную и сама сменяется серной. По нашим данным, на Гаурдаке при серном метасоматозе формирование минерального парагенезиса происходит в такой последовательности: целестин—кальцитовая стадия — серно—кальцитовая — серная. Образование вторичных биогенных кальцитов, метасоматически замещающих гипс—ангидриты, является показателем серного метасоматоза. Очевидно, процессы метасоматического замещения биогенным кальцитом (без серы) гипс—ангидритов с образованием мощных толщ эпигенетических известняков при определенных условиях могут иметь значительные масштабы.

Наконец, следует указать на палеогеографический критерий — создание сходных с отмеченными условиями образования серы в более ранние периоды неоген—четвертичного времени и последующее захоронение сероносных структур под толщей континентальных пород. На Гаурдаке к концу формирования месторождения четвертичные отложения полностью перекрыли его площадь и значительную часть Гаурдакского поднятия. При дальнейшем эпейрогеническом погружении можно было бы ожидать захоронения под четвертичными отложениями полностью всего поднятия. Подобные условия наблюдаются на приразломных структурах в районах Донгузсырт и Шальгеричбаба, расположенных в Юго—Восточных Каракумах.

## МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА ПЕРСПЕКТИВ СЕРОНОСНОСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ СССР

Растущие потребности в самородной сере требуют расширения известных и создания новых сырьевых баз. В 1967–1970 гг. осуществлена прогнозная оценка сероносности европейской части СССР геологическим институтом г. Казани и под его методическим руководством Львовской, Кременчугской, Харьковской и Крымской экспедициями Министерства геологии УССР, Северо-Кавказского геологического управления, Казахстанского научно-исследовательского института минерального сырья и Башкирского геологического управления.

Основные аспекты использования определяющих факторов в прогнозной оценке были опубликованы ранее в ряде работ (Соколов, 1958; Отрешко, 1966; и др.), поэтому в настоящей статье рассматриваются вопросы методики прогнозирования, получившие новую разработку или трактовку.

### Мелкомасштабное прогнозирование

Исследования проведены с позиций изучения роли формационных условий галогенных толщ и заключенных в них сульфатно-карбонатных комплексов, геотектонического и структурного размещения серной минерализации и оруденения, размаха и стадийности неотектонических движений, гипергенных изменений сульфатно-карбонатных комплексов, парагенезиса нефти и серы.

В осадочной толще источниками элементарной серы служат сульфатные породы, сульфатные и сероводородные воды. Сульфатные породы являются членами парагенного ряда пород галогенных формаций. В настоящее время минеральные находки и месторождения серы известны в образованиях всех типов галогенных формаций (Страхов, 1963): 1) континентального засоления засушливых областей пустынь и полупустынь – Западная Туркмения; 2) мелких лагун – Шорсу, Чекур-Кояш; 3) полузамкнутых и отшнуровывающихся заливов – Предкарпатье; 4) краевых частей морей и открытых заливов – Поволжье, Предуралье, Северный Прикаспий.

В пределах территории европейской части СССР развиты кайнозойские (неогеновые), мезозойские (верхнеюрские и нижнемеловые), палеозойские (пермские, каменноугольные, девонские) галогенные формации. Сульфатные составляющие их – гипсы и ангидриты – образуют значительные по мощности толщи, пачки слоев, отдельные слои и, наконец, прослойки и включения в карбонатных или терригенных породах. Соотношение сульфатных, карбонатных и терригенных слоев в разрезах – один из основных факторов, определяющих геологическое строение месторождений серы и условия их образования.

Распространение сульфатноносных толщ различного возраста обуславливает стратиграфическую приуроченность серного оруденения в том или ином регионе.

Средне- и верхнедевонские разрезы переслаивающихся карбонатов, гипса и ангидрита, встреченные в выходах на дневную поверхность и в участках неглубокого залегания, меридионально протягиваются от Лиепай до Риги в Прибалтике, известны в пределах Смоленской, Псковской и Новгородской областей, а также вскрыты на различных глубинах (местами совместно со слоями соли) во многих районах Подмосковной синеклизы и в Притиманье. Мощная средне- и верхнедевонская галогенная калиеносная толща развита в Припятском прогибе и Днепрово-Донецкой впадине. Сравнительно меньше распространены верхнедевонские сульфатно-карбонатные породы к северо-западу от Предкарпатского прогиба.

Верхнекаменноугольные, местами среднекаменноугольные сульфатно-карбонатные толщи обрамляют Тиман.

Исключительно широко распространены галогенные разрезы нижней перми. На северо-восточном обрамлении Подмосковной синеклизы и вдоль Волжской антеклизы кроме сульфатно-карбонатных слоев они местами (Солигалич, район Держинска) содержат также маломощные толщи каменных солей. В Предуральском прогибе, в Прикаспийской впадине и на сопредельных частях Русской платформы обычны мощные нижнепермские разрезы, сложенные главным образом кунгурскими солями, нередко с выдержанными калиеносными горизонтами. Вдоль западного борта Предуральского прогиба в толщу солей внедрены сакмарские и артинские рифовые массивы, часто выходящие на дневную поверхность или залегающие на сравнительно небольших глубинах. Меньшее по размерам поле нижнепермской галогенной толщи приурочено к Днепрово-Донецкой впадине. Здесь также имеются калиеносные горизонты.

Сульфатно-карбонатные разрезы казанского яруса верхней перми обычны в северо-восточной части Подмосковной синеклизы, в ее восточном и юго-восточном обрамлении, в западном Притиманье и вдоль западного склона Волжской антеклизы. По левобережью Волги они прослеживаются до Северного Прикаспия и наблюдаются в его западной половине. В Бузулукской впадине мощность казанского яруса возрастает, здесь появляются слои каменной соли. Сравнительно небольшое поле соленосных верхнепермских образований развито в пределах Прегольской впадины на территории Калининградской области и Литвы.

Западные и южные районы европейской части СССР характеризуются наличием верхнеюрской галогенной формации в основном сульфатно-карбонатного состава. Такие разрезы встречены в Предкарпатском и Предобруджском прогибах, протягиваются полосой вдоль Кавказского горного сооружения. К западу от р. Белой на северном склоне Кавказа, а местами и на его южных склонах сульфатно-карбонатные верхнеюрские разрезы обрамляются рифогенными образованиями. В районе Шедока верхнеюрская толща содержит пласты каменных солей. Локальные участки сульфатоносных пород верхней юры известны в бассейне рек Куры и Аракса.

Нижнемеловые сульфатоносные карбонатные толщи встречены в Дагестане, юго-восточнее Батуми и, по-видимому, имеются в юго-западном обрамлении Большого Кавказа.

Миоценовые галогенные формации с толщами каменной и слоями калийных солей известны в Предкарпатском и Закарпатском прогибах.

Верхнемиоценовая тирасская сульфатно-карбонатная свита широко развита в зоне сочленения Русской платформы и Предкарпатского прогиба, а также в углубленной части последнего. Сульфатно-карбонатные слои верхнего тортон локально встречаются на Керченском полуострове (чокракский горизонт) и более широко (чокракский и караганский горизонты) в южной части Предкавказского прогиба. В Закавказье миоценовая соленосная толща имеется в Ереванской, Нахичеванской и других более мелких впадинах. Галогенез в этих впадинах, по-видимому, продолжался и в сармате.

Таким образом, сульфатноносные породы в пределах европейской части СССР отсутствуют лишь на Кольском полуострове, в Воронежском своде, Украинском кристаллическом щите и на обрамляющих складчатых сооружениях: Тимане, Урале, Кавказе и Карпатах. Следовательно, почти вся исследуемая территория обладает потенциальными источниками самородной серы. Поэтому основная роль в прогнозе должна быть отведена анализу комплекса условий, обеспечивающих реализацию литологических предпосылок.

Направленность геологических процессов в любом регионе определяется его геотектоническим и структурным развитием. Тектонические движения земной коры вызывают процессы миграции серы и накопления сульфатной, сульфидной и элементарной форм ее на всех этапах образования и преобразования горных пород. Геотектоническая обстановка, климатические и палеогеографические условия обуславливают размещение галогенных формаций.

Формирование залежей самородной серы и последующее их разрушение связаны с более поздними этапами тектонической жизни. На этих этапах решающую роль в локализации процессов рудообразования играют структурные факторы. Пути миграции углеводородов и минерализованных сероводородных вод, оказывающих решающее влияние на образование серных залежей, являются разломные зоны и отдельные разломы.

Проявления и месторождения серы встречаются в пределах различных тектонических структур. Отмечаются многочисленные находки серы и ее месторождения в предгорных прогибах: во внутренней (Трускавец, Дзвиняч) и внешней (Горожанка, Медынич и ряд других месторождений) зонах Предкарпатского прогиба; в Азово-Кубанском прогибе (Чекур-Кояшское месторождение и серопроявления в чокракских и караганских отложениях Керченского полуострова и Западного Предкавказья); в Предуральском прогибе (серная минерализация в рифовых массивах и антиклинальных структурах Актюбинского, Башкирского и Пермского Приуралья); в Предтиманском прогибе (Дозмерское месторождение и проявления серы).

В краевых частях платформ в зонах сочленения с прогибами расположены известные предкарпатские месторождения СССР и Польши, а также многочисленные серопроявления (Башкирское и Пермское Приуралье, Саратовское Заволжье, южная часть Тиманского поднятия). Встречена сера на погруженном склоне Балтийского щита (бассейн р. Пинеги). Внутриплатформенные структуры (Среднее Поволжье) содержат месторождения и многочисленные проявления серы, которые локализуются в краевых частях сводов (Жигулевско-Пугачевский, Токмовский), валов

(Елховско-Боровский и другие) и разделяющих их впадин (Мелекесская и др.). В складчатых предгорьях Северного Кавказа и Закавказья также известны проявления серы. Наконец, последние обычны в областях развития солянокупольной тектоники (Прикаспийская и Днепровско-Донецкая впадины).

В.И. Вернадский и А.Е. Ферман, исходя из химической активности, определяющей узость термодинамической зоны устойчивости серы в элементарном виде, акцентировали внимание на "молодом" возрасте ее накоплений. Выявленная А.И. Отрешко (1960) связь серного оруденения средневожских месторождений с долинами доплиоценового размыва явилась основой для установления закономерностей размещения известных месторождений и проявлений серы со стадиями тектонических движений альпийского этапа орогенеза. Тектонические движения, обуславливающие нахождение сульфатно-карбонатных разрезов в зоне смешения глубинных сероводородных и поверхностных сульфатных вод, сопровождались образованием глубоких долин, врезанных в сульфатно-карбонатные толщи. Глубина вреза долин определяла гипсометрическое положение зоны смешения вод и возникающих в ее пределах сероносных горизонтов. Таким образом, важную роль играла интенсивность движений.

Для прогнозных построений суммарная амплитуда неотектонических движений ориентировочно определена по мощности третичных неогеновых отложений, гипсометрическим отметкам поверхностей выравнивания и террас, а также по гипсометрии подошвы неоген-четвертичного карстового этажа. Исследования по неоген-четвертичному глубинному карсту пока осуществлены только для востока Русской платформы. Установлена разновозрастность серного оруденения в разных регионах в связи с интенсивностью той или иной фазы альпийского орогенеза. Предверхнеюрскому размыву обязаны находки серы в сульфатоносных разрезах верхнего девона Предкарпатья. Сероаккумуляция в нижнепермской толще Актюбинского Приуралья связано, по-видимому, с этим же размывом, однако и здесь, как и в Оренбургской области, не исключен пересмотр юрского возраста в пользу третичного.

В связи с олигоцен-миоценовыми долинами известны проявления серы в солянокупольных структурах Днепровско-Донецкой впадины (в пределах контуров распространения берекской толщи) и в Предкавказье. С предсарматским размывом связаны месторождения и проявления серы Предкарпатья, Крыма, западной части Северного Кавказа. Предакчагыльским размывом обусловлены серопроявления и месторождения Поволжья, Северного Прикаспия, Притиманья, северо-западного обрамления Русской платформы. С предакчагыльским и предапшеронскими размывами связаны серопроявления в западной части Северного Кавказа и на Керченском полуострове, а также в Закавказье.

Ритмичность неотектонических движений вызывает повторяемость в разрезах зон серной минерализации и оруденения. Сероносные зоны и сероносные комплексы коррелируются с поверхностями выравнивания, геоморфологически выраженными в районах преобладающего воздымания. Эта коррелятивная зависимость позволяет ориентировочно рассчитать возможную глубину нахождения серной минерализации и оруденения. Так, в Предкарпатском прогибе соответственно отметкам сарматской поверх-

ности выравнивания полонинского рельефа (до 1200–1400 м) можно ожидать встречу серной минерализации и оруденения до глубин 1200–1400 м. В Предкавказском прогибе возможные глубины встречи самородной серы должны превышать 2000 м, а в Предуральском прогибе – 800–1200 м.

Таким образом, палеогеографический критерий приуроченности серных месторождений к площадям, смежным с долинами неогеновых размывов, получил дальнейшую разработку, что позволяет определять перспективы конкретных районов и структур.

Принципиальные представления о роли гидрогеохимических факторов в генезисе самородной серы заложены А.С. Уклонским (1940), по мнению которого серообразование происходит в зоне смешения вод различных типов. В настоящее время большинство геологов считают, что самородная сера образуется при смешении глубинных сероводородных вод с поверхностными сульфатными водами.

В природе наблюдаются сероводородные воды различных типов: гидрокарбонатные, сульфатные, хлоридные. Для прогнозных построений необходимо знать, имеет ли принципиальное значение тип сероводородных вод. Н.П. Юшкин (1962, 1968) на примере месторождения Шорсу показал, что сера образуется при смешении хлоридно-натриевых и хлоридно-кальциевых сероводородных вод с кислородсодержащими сульфатными инфильтрационными водами. Для прогнозной оценки важно выявить связь сероносных районов с районами распространения разных типов сероводородных вод, а также с концентрацией сероводорода и сульфатов в водах. Сведения о современной гидрогеохимической обстановке в разрезе осадочного чехла (ввиду унаследованности) вполне могут использоваться для мелко- и среднемасштабного прогнозирования.

Согласно данным И.К. Зайцева и Н.И. Толстихина (1966), А.В. Щербакова (1968), в основании осадочного чехла Русской платформы выделяются зоны развития вод различных геохимических обстановок: окислительной, переходной, восстановительной. В зонах восстановительной и отчасти переходной обстановки воды содержат сероводород, водород, углеводороды, углекислый и другие газы. Для этих зон характерны термokatалитические реакции превращения органических веществ в жидкие и газообразные углеводороды.

Известные сероносные районы совпадают с районами распространения вод восстановительной и переходной геохимических обстановок, а также с районами повышенной активности неотектонических движений. Такое совпадение указывает на поступление вод в верхние части осадочного разреза. Очевидно, путями подтока глубинных вод служили разломы и разломные зоны, образовавшиеся или активизировавшиеся в неотектонический период движений земной коры. Эта взаимосвязь использована при выделении перспективных районов на территории мало изученного бурением северо-западного обрамления Русской платформы. Так, на междуречье Северной Двины и Мезени обнаружены проявления самородной серы в коренном залегании.

Выведенная закономерность может использоваться как гидрогеохимический критерий при мелкомасштабном прогнозировании. Путем совмещения карт суммарной амплитуды неотектонических движений и карт

гидрогеохимической зональности в основании осадочного чехла на территории распространения сульфатно-карбонатных комплексов выделяются зоны гипергенной минерализации и связанного с ними серного оруденения в сульфатно-карбонатных породах.

В приповерхностной части земной коры широко распространены сероводородные гидрокарбонатные и сульфатные воды. Образование сероводорода в них связано с бактериальными процессами сульфатредукции, которые особо активизируются при разрушении нефтяных залежей. Такое широкое развитие сероводородных вод не позволяет использовать данные о них непосредственно для прогноза.

В пределах артезианских бассейнов и гидрогеологических массивов, характеризующихся спокойной тектонической обстановкой, переход от одной гидрохимической зоны к другой постепенный, что исключает смешение вод различных типов. Поэтому при прогнозе необходимо выделить районы, в разрезе сульфатоносных пород которых нарушена обычная гидрохимическая зональность, и оконтурить в плане три гидрохимические зоны: застойного режима, замедленного и активного водообмена.

Анализ изменения гидрохимических разрезов и минерализации вод в сероносных районах Поволжья показал совмещение контуров последних с районами распространения вод разных гидрогеохимических зон. Средневожжский сероносный бассейн совмещается с территорией резкого повышения содержания сульфатов (до 1530 мг/л) и сероводорода в нижнекаменноугольном водоносном комплексе Куйбышевского гидрохимического района.

Выделение гидрохимических зон целесообразно проводить по концентрации брома, сульфат-иона и сероводорода. Изолиния содержаний брома 600 мг/л достаточно хорошо ограничивает зону вод застойного режима, характеризующуюся обычно низким содержанием сульфатов. Зону замедленного водообмена ограничивает изолиния содержания сероводорода 10-20 мг/л. В пределах этой зоны обособляются площади распространения высокосульфатных вод с повышенными содержаниями сероводорода по изолинии содержания сульфатов - 1000 мг/л.

Современная гидрохимическая зональность сформировалась и продолжает формироваться в связи с неотектоническими движениями. Естественно, что палеогидрохимическая зональность во время сероаккумуляции имела иной характер. Причиной этого остается тектоническая перестройка структур. Активизация или замедление движения, сопровождаемые эрозией или накоплением осадков, сразу же отражаются на изменении химического и газового состава, минерализации и температуры вод.

Сероводородные воды верхних частей осадочного разреза, образующиеся в результате биогенной сульфатредукции и развитие в зоне активного и замедленного водообмена, распространены в основном вне определенной связи с регионами повышенной активности неотектонических движений и перспективными сероносными районами. Давно установлена пространственная взаимосвязь серных и нефтегазовых месторождений. Трактовка генетической сущности этой связи многообразна. Большинство исследователей серных месторождений считают наиболее вероятным процесс непосредственного восстановления углеводородами сульфатов до самородной серы через сероводород. В настоящее время эта схема

признается почти всеми геологами, независимо от принимаемого варианта редукиции — биохимического или химического. В связи с такой трактовкой однозначно выступает временная взаимосвязь — сначала нефть, затем сера, что неизбежно приводит к желанию рассматривать месторождения нефти как непосредственный указатель локализации месторождений серы. Безусловно, при многообразии размещений указанных месторождений могут быть и случаи прямого совпадения.

Проведенные исследования по Восточно-Европейской сероносной провинции (Отрешко, 1966) позволили прийти к выводу, что совместное нахождение месторождений нефти и серы обусловлено: 1) общностью тектонической истории развития нефтеносных и сероносных территорий и 2) обильным продуцированием сероводорода как исходного продукта для образования серных залежей в пределах нефтегазоносных областей.

Таким образом, принципиальными основами парагенезиса серы и нефти можно считать следующие положения.

Глубинный (фреатический) сероводород, играющий основную роль в образовании сероносных залежей, поступает из термokatалитической зоны по разломным и ослабленным зонам земной коры одновременно с углеводородами. Именно поэтому происходит одновременное образование в раскрытых структурах месторождений серы, а в закрытых структурах — месторождений жидких и газообразных углеводородов. Сероносные структуры, в последующем перекрытые достаточно мощной крышкой глинистых пород, могут оказаться вмещающими для углеводородов. Сера в них является более ранним образованием и последующее поступление углеводородов может привести к ее частичному растворению, перемещению и перекристаллизации.

Разрушение сформировавшихся месторождений жидких и газообразных углеводородов, сопровождающееся биогенной редукицией сульфатов до сероводорода, не может привести к образованию значительных скоплений самородной серы. В результате изменчивости геохимических обстановок сера, образуемая в результате окисления биогенного сероводорода, претерпевает дальнейшее окисление до сульфатов, и в этой форме мигрирует за пределы разрушающейся структуры.

Следовательно, пространственная взаимосвязь серных и нефтегазоносных месторождений может использоваться в прогнозных построениях как одна из общих предпосылок сероносности.

### Среднемасштабные прогнозные карты

Среднемасштабные прогнозные карты составляются в соответствии с описанным методическим подходом. Анализ геологических материалов проводится путем составления серии вспомогательных карт: палеогеологической, литолого-фациальной, структурно-тектонической, гидрохимической, закарстованности. При составлении прогнозных карт анализировались также данные по скважинам разного назначения, вскрывшим разрезы сульфатно-карбонатных пород. Основное внимание акцентировалось на сведениях о наличии в разрезах серопроявлений, эпигенетических минералов, в том числе и парагенетической сере, интервалов перекристаллизации и карстовой разрушенности пород, битуминозности,

газоносности, а также на химическом составе и минерализации вод. Эти сведения позволяют выявить типы литологических разрезов сульфатно-карбонатных комплексов и мощности зон гипергенных изменений их в различных регионах; выделить долины неогеновых и других размывов, а также интенсивность проявления карстовых процессов на глубине; оценить размах неотектонических движений и выявить особенности гидрохимической зональности.

На стадии среднемасштабного прогноза осуществляется анализ структурного размещения месторождений и дифференциация прогнозных площадей, выделенных при мелкомасштабном прогнозе.

Каждой геотектонической зоне присущи свои особенности серных залежей и их приуроченность к структурам определенного типа. Внутриплатформенные структуры Среднего Поволжья несут оруденение в пологих крыльях крупных антиклинальных складок, на сводах и в разделяющих их впадинах. В краевой части платформы, в Предкарпатье, где на общем фоне моноклинального залегания более четко выражены антиклинальные структуры значительной протяженности, оруденение в их пределах характеризуется значительной протяженностью, но довольно быстрой сменой мощности залежи. Роль антиклинальных складок возрастает в предгорных и межгорных прогибах и впадинах. Местоположение сероносных залежей в пределах структуры определяется тем, какая часть структуры была выведена в зону рудообразования. В эту зону могут выводиться отдельные блоковые куполообразные структуры, в том числе рифовые массивы и соляные купола.

Поскольку в каждой геотектонической зоне с различной интенсивностью проявляется и дизъюнктивная разломная тектоника, важно выяснить возможности и способы использования и этого критерия.

В районах внутриплатформенных структур и краевых частей платформы разломы определяют места возникновения долин размывов, вскрывающих сульфатоносные разрезы. С разломами связано и последующее разобщение рудных залежей на блоки (Предкарпатье). В предгорных и межгорных прогибах и впадинах разломы ограничивают структуры, а связанные с ними трещиноватость и зоны дробления обеспечивают места локализации процессов рудообразования. В разное время исследователи серных месторождений указывали на связь серного оруденения с разломами в различных регионах: В.П. Ренгартен (1917) и Д.В. Дробышев (1930) — для Горного Дагестана; А.Н. Мазарович (1939) — для междуречья Сока и Самары в Поволжье; Ф.И. Панин, М.Г. Горбачев, В.Д. Коган, И.С. Лазарев — для Гаурдака; Г.Т. Саксеев, И.И. Алексенко, В.Ф. Полкунов — для Предкарпатья.

Эффективное использование этой важной зависимости при прогнозе и поисках требует определения временного диапазона возникновения или активизации разломных зон, связанных с ними зон дробления и геохимической активности. Разломы, сопровождающиеся долинами размывов, являются рудоконтролирующими, а опережающие их разломы в ряде случаев и рудовмещающими. Это предположение требует дальнейшей разработки.

На стадии среднемасштабного прогноза можно использовать для дифференциации и оценки перспектив площадей критерий карстовой разрушен-

ности сульфатно-карбонатных комплексов и заключенных в них серных залежей. Вмещающие серу породы — сульфаты и карбонаты — отличаются повышенной растворимостью, особенно при расположении их выше базисов эрозии, а сера в зоне активного водообмена подвергается быстрому окислению. Эти два процесса тесно между собой связаны и обуславливают один другой. Интенсивно закарстованные разрезы ввиду их повышенной проницаемости, как правило, насыщены кислородсодержащими водами. В таких условиях сероносные залежи подвергаются как физическому (при просадках и обрушении вмещающих толщ), так и химическому разрушению.

При прогнозной оценке важен учет не столько поверхностных форм карста, как интенсивности и мощности неоген-четвертичного карстового этажа в разрезе, а также анализ взаимосвязи поверхностных форм карста с интенсивностью его развития на глубине. Для каждого региона эта взаимосвязь имеет специфические черты и их выявление требует пристального внимания.

Указанный критерий был использован авторами для районов Поволжья и Приуралья. В меньшей мере сведения о карсте использованы Т.А. Машенко для Северного Кавказа, а И.И. Алексенко и А.Н. Денисевич — для Предкарпатья. Накопившиеся материалы убеждают нас в том, что этот критерий крайне важен, сложен, требует дальнейшей разработки и обязательного использования, особенно на стадии крупномасштабного прогноза.

Для районов, где проводятся прогнозные исследования, характерна различная полнота необходимых материалов, что определяет преимущественное использование тех или иных критериев.

Предкарпатский бассейн весьма детально охарактеризован многочисленными скважинами поисковой и детальной разведки, однако по ним не было проведено надежного разделения отложений тирасской свиты и сарматского яруса. В процессе прогнозных исследований лишь предварительно выделена нижняя граница сарматских образований, а также выяснены в общих чертах особенности расположения долины предсарматского размыва и их роль в размещении известных серных месторождений. Предсарматские эрозионные долины развились вдоль крупных разломов, в районе которых размыву нередко подвергалась вся толща пород тирасской свиты. Сульфатно-карбонатные разрезы на смежных площадях сероносны.

Зона серной минерализации и оруденения Предкарпатского района в одних случаях размещается в кровле гипс-ангидритового горизонта и охватывает значительную часть косовской свиты. Кальцитизированные и осерненные мергели с прослоями известняков ранее описывались под названием ратынского горизонта. В других случаях, на участках, приближенных к долинам предсарматского размыва, серному оруденению подвергались карбонатные породы, подстилающие гипс-ангидритовый горизонт. Это оруденение ранее связывалось с хотинским горизонтом.

В юго-восточной части бассейна, где в гипс-ангидритовом горизонте выделяются интервалы с прослоями карбонатных пород, серное оруденение развито по этим интервалам, напоминающим осерненные горизонты средневожжских месторождений. На участках, удаленных от долин

размывов и характеризующихся увеличением косовской толщи до 30 м и более, сероносные залежи выклиниваются. Разрезы тирасской свиты на дневной поверхности и при неглубоком их расположении подвержены карстовым нарушениям; имеющиеся здесь останцы сероносных пород промышленного и поискового значения не имеют.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности открытия в изученных контурах Предкарпатского бассейна новых месторождений в подгипсовой части разреза и в гипс-ангидритовом горизонте. Намечены перспективные площади и вдоль разломных зон углубленной части Предкарпатского прогиба, в пределах которых предполагается открытие месторождения, пригодные для добычи методом подземной выплавки.

Керченский полуостров характеризуется рядом новых находок серной минерализации и оруденения. Описания кернов структурно-картировочных скважин на нефть представляют интерес с позиций прослеживания долин предсарматских размывов. Базальные образования, выполняющие эти долины, содержат значительные количества обломочного материала и рассматриваются рядом геологов в качестве брекчий грязевых вулканов.

Сероносные залежи приурочены здесь к линзам гипс-ангидритовых пород чокракского горизонта, накопленным в отделенных рифами лагунах. О распространении этих линз можно судить, исходя из размещения соответствующих рифовых массивов, показанных на крупномасштабной геологической карте. Участки гипсоносных разрезов, размещающиеся в пределах положительных структур или выходов чокракского горизонта на дневную поверхность в местах распространения сарматских отложений, выделены в качестве перспективных для поисков. В пределах одной из выделенных перспективных площадей (к северу от Чекур-Кояшского месторождения) выявлена крупная сероносная залежь, могущая представлять промышленную ценность.

Днепровско-Донецкая впадина располагает многочисленными солянокупольными структурами, в которых галогенные девонские и нижнепермские породы выведены на дневную поверхность или находятся на небольших глубинах. В разрезах 19 солянокупольных структур встречена самородная сера. Вероятно, по аналогии с побережьем Мексиканского залива, в кепроках солянокупольных структур будут открыты крупные месторождения серы. Прогнозными исследованиями установлено размещение солянокупольных структур с находками серы в пределах или в обрамлении олигоцен-миоценовой долины, выполненной угленосными берекскими образованиями. Серная минерализация встречена не только в верхней части солянокупольных структур, сложенной брекчированными глинами, мергелями, известняками, песчаниками и гипсами, но и в подстилающей толще солей.

По литологическому составу кепроки Днепровско-Донецкой впадины существенно отличаются от состава сероносных кепроков побережья Мексиканского залива; для первых характерно обогащение терригенными породами и эпигенетическая сульфидная минерализация. В этих условиях процессы серного оруденения были затруднены, самородная сера, видимо, в основном играла роль парагенетичного сульфида минерала, как это наблюдается в зонах вторичного обогащения сульфидных месторождений.

Поэтому солянокупольные структуры Днепрово-Донецкой впадины для поисков месторождений самородной серы рассматриваются как малоперспективные. Более интересными в этом отношении считаются деградационные впадины, аналогичные Ново-Дмитриевской.

При составлении среднемасштабной прогнозной карты Северного Кавказа в основу были положены данные геологического описания обнажений верхнеюрских сульфатно-карбонатных разрезов и гидрохимического опробования родников и водотоков. Ряд скважин на территории выходов или неглубокого залегания верхнеюрских образований встретил серу на различных глубинах. На отдельных участках развития верхнеюрских пород прослежены зоны их гипергенного изменения. Эти зоны, лишенные серы из-за окислительной обстановки на дневной поверхности, содержат ее на глубине.

Одними из главнейших при прогнозных построениях являются критерии гидрохимической зональности и приуроченности к разломным зонам. К перспективным отнесены районы верхнеюрских сульфатоносных разрезов, в пределах которых развиты сероводородные воды с содержаниями сульфатов выше 1000 мг/л: междуречье Белой и Кубани, междуречье Малки - Баксана, Петровской группы месторождений и междуречье Самур - Чирах-чай. Район Аварской группы серных месторождений рассматривается как малоперспективный ввиду интенсивной эрозионной и карстовой разрушенности. Особое внимание обращено на возможность выявления серных месторождений на западе междуречья Кубань - Белая в зоне перехода верхнеюрских сульфатно-карбонатных разрезов в рифогенные.

Северный Прикаспий послужил объектом дальнейшего изучения литологического состава и мощности кепроков солянокупольных структур. Получены новые материалы о существенном отличии кепроков Северного Прикаспия от сероносных кепроков побережья Мексиканского залива, а также о различиях палеогеографических обстановок серного рудогенеза в этих двух давно сопоставляемых регионах. В результате проведенных исследований дальнейшие прогнозные и поисковые работы рекомендуется проводить в бортовых частях Прикаспийской синеклизы, где имеются благоприятные типы сульфатно-карбонатных разрезов нормального осадочного происхождения. В числе первоочередных для дальнейших исследований рассматривается район междуречья Волги и Дона, в пределах которого обнаружены серопроявления. Некоторые из них (Нижне-Иловлинская площадь) характеризуются повышенными концентрациями полезного компонента.

В Нижнем и Среднем Поволжье имеется несколько перспективных районов, сопоставимых с районом разведанных средневожских месторождений.

В Притиманье основой для прогнозирования явились материалы структурно-картировочных скважин на нефть, а также данные о неотектонической истории развития региона. К числу перспективных отнесены районы южной и северной зон сочленения Тиманского кряжа с Печорской впадиной, районы Джемим-Парминской и Ксенофоновской структур и Тобысской впадины, и особенно район Четласского горста.

Составлены детальные карты для зоны сочленения платформы и прогиба в Башкирском и Актюбинском Приуралье. При составлении карты

Башкирского Приуралья применен метод морфоструктурного анализа. Использование этого прогрессивного метода в исследованиях на серу требует дальнейшей разработки.

Прогнозная карта Актюбинского Приуралья составлена по данным геологического строения и структуры площадей с привлечением данных структурного бурения. К числу перспективных отнесены структуры с выходами на дневную поверхность кунгурских и артинских образований в их частях, перекрытых верхнеюрскими отложениями.

Выполненные исследования позволили:

- 1) дать общую оценку перспектив сероносности европейской части СССР как основы для планирования исследований на самородную серу;
- 2) выявить относительную перспективность площадей в отдельных сероносных и прогнозных районах как основы для постановки крупномасштабного прогноза и поисков;
- 3) подтвердить достоверность известных критериев, уточнить методику их применения и разработать принципы использования при прогнозных построениях новых факторов.

Полученные в процессе работы выводы по методике работ использовались геологоразведочными организациями Министерства геологии СССР и таким образом проверялись непосредственно на практике.

За этот период начаты поисковые работы на серу в двух новых районах – Актюбинском Приуралье и Пермском. Полученные результаты подтверждают теоретические выводы и необходимость продолжения работ, а также уточняют представления о методике поисков. Возобновление поисковых работ на Керченском полуострове также дало положительные результаты, указывающие на необходимость продолжения здесь поисков.

Начаты работы по составлению крупномасштабных прогнозных карт трестом Киевгеология, Уральским и Ухтинским геологическими управлениями. Постановка таких работ необходима и в Северо-Кавказском, Нижне- и Средне-Волжском управлениях.

Крупномасштабный прогноз требует привлечения более детальных геологических, геофизических, геоморфологических и других материалов. Уже сейчас имеется ряд методов, позволяющих использовать количественные характеристики: геофизические и геохимические для выявления разломных зон и гидрохимических аномалий, потенциметрический – для выделения участков специфических соотношений pH и Eh, анализ изотопного состава – для выделения пород с аномальными соотношениями изотопов углерода и серы. Часть указанных и другие методы находятся в разработке или требуют проверки непосредственно в практике геологоразведочных работ. Применение их неизбежно приведет к повышению эффективности поисков и разведок месторождений серы. Целесообразно использовать эти методы с постановкой специализированных работ не на стадии крупномасштабного прогнозирования, а на первой стадии поисков. Площади под постановку поисковых работ, включающих и комплекс указанных специализированных исследований, должны выделяться путем анализа геологических, геохимических, гидрохимических, геофизических и других материалов. Это ускорит введение новых площадей в сферу поисков, а применение специализированных методов поможет в выборе направления и методики работ.

## Литература

- Дробышев Д.В. К вопросу о генезисе месторождений серы Горного Дагестана. Материалы по общей и прикладной геологии, вып. 152, М., изд. Госгеолкома, 1930.
- Зайцев И.К., Толстихин Н.И. Гидрохимическая карта СССР. Минеральные воды. М., Главгеодезкартиздат, 1966.
- Краткое методическое руководство по прогнозу месторождений серы в осадочных образованиях. - Изд. Геол. ин-та, Казань, 1968.
- Мазарович А.Н. Геологическое строение Заволжья и пути его изучения. - Сов. геол., т. 9, №3, 1939.
- Отрешко А.И. Геология и условия образования серных месторождений Средневожского бассейна. - Труды ГИГХСа, вып. 6, 1960.
- Отрешко А.И. Принципы и методы прогнозов месторождений самородной серы среди осадочных образований. - Сов. геол., 1966, №6.
- Ренгартен В.П. Сера в Дагестанской области. Отчет о состоянии и деятельности Геолкома за 1916 г. Изд. Геолкома, 1917, №1.
- Соколов А.С. Основные закономерности геологического строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. - Сов. геол., 1958, №5.
- Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Закономерности состава и размещения аридных отложений, т. III. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Уклонский А.С. Парагенезис серы и нефти. Ташкент, Изд. Узбекского филиала АН СССР, 1940.
- Шербатов А.В. Геохимия термальных вод. М., "Наука", 1968.
- Юшкин Н.П. Геологические особенности и генезис серных месторождений района Шорсу (Узбекская ССР). - Изв. АН СССР, серия геол., 1962, №4.
- Юшкин Н.П. Минералогия и парагенезис самородной серы в экзогенных месторождениях. Л., "Наука", 1968.

## ГЕНЕЗИС МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕРЫ ПРЕДКАРПАТСКОГО БАССЕЙНА И НАПРАВЛЕНИЕ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Предкарпатский бассейн находится на юго-западной окраине Русской платформы в зоне сочленения с Предкарпатским краевым прогибом. В строении бассейна участвуют отложения четвертичного, неогенового, мезозойского и палеозойского возраста. Серные залежи расположены в отложениях неогена. Самородная сера приурочена к карбонатным породам — метасоматическим известнякам, генетически связанным с гипс-ангидридами. Эти карбонатные и сульфатные отложения стратифицируются как тирасская свита верхнетортонского подъяруса (миоцен) и имеют суммарную мощность 20–40 м. Отложения тирасской свиты залегают на платформе на глубине от первых десятков до 462 м; во внешней зоне прогиба они опускаются до 100 м и глубже. Тирасскую свиту подстилают нижнетортонские или верхнемеловые отложения обычно с размытой поверхностью.

На отложениях тирасской свиты лежат глины верхнего тортон (ковская свита) и нижнего сармата суммарной мощностью до 300 м на платформе и до 1000 м в прогибе. Миоценовые отложения покрыты сплошным чехлом четвертичных образований с мощностью до 30 м.

Связь самородной серы с сульфатно-карбонатными отложениями постоянна, это общепризнано для всех советских и зарубежных месторождений серы в осадочных породах. На первой стадии поисково-разведочных работ в Предкарпатье сероносные надгипсовые известняки ошибочно относили к ратынскому горизонту тирасской свиты. Поэтому при геолого-разведочных работах ставилась задача выявления горизонта ратынских известняков как основного рудного горизонта, а лежащие под ними гипс-ангидриты днестровского горизонта почти не изучались.

С открытием Загайпольского и Тейсаровского месторождений серы значение тирасских отложений, в частности гипс-ангидритов, для поисков самородной серы пересмотрено. Было установлено, что самородная сера находится в известняках не ратынского горизонта, а во вторичных, образованных по гипс-ангидритам днестровского горизонта. Такой подход уточнил в объеме тирасской свиты возраст пород, с которыми связана самородная сера, изменил прежние литолого-фациальные представления и показал, что сульфатные породы имеют важное генетическое значение для образования самородной серы и формирования месторождений. Было определено, в каком именно стратиграфическом и литологическом горизонте нужно искать серу.

Рассмотрим три основных фактора, раскрывающих закономерности размещения серных месторождений Предкарпатья: стратиграфический, литологический, структурно-тектонический.

Как показали проведенные работы на серных месторождениях Предкарпатского бассейна среди сульфатно-карбонатных отложений тирасской свиты существуют две генетические разновидности известняков — седи-

ментационные (первичные) известняки – фации карбонатных осадков и известняки вторичные, метасоматические, образовавшиеся по гипс–ангидритам. Первичные известняки относятся к ратынскому горизонту, стратотипом их являются известняки г. Ратын (окрестности г. Львова). Вторичные – метасоматические известняки – объединяются вместе с гипс–ангидритами в днестровский горизонт. Указанные известняки имеют разное отношение к самородной сере. Как было показано, сероносны вторичные известняки днестровского горизонта.

Первичная седиментационная природа ратынских известняков устанавливается по слоистости, которая хорошо видна в некоторых обнажениях; по сохранившимся в известняках отпечаткам и остаткам фауны, микрофауны и флоры, подтверждающим их морское происхождение; по площади распространения известняков, превышающей площадь распространения гипс–ангидритов, что характеризует фациальную самостоятельность карбонатных осадков по отношению к нижележащим гипс–ангидритам.

Вторичные сероносные известняки в отличие от первичных генетически связаны с гипс–ангидритами. Убедительно доказывает их метасоматическое образование по гипс–ангидритам перемежаемость этих пород. Сероносные известняки залегают либо в кровле или подошве гипс–ангидритов, либо многократно переслаивают или полностью замещают их толщу. Мощность сероносных известняков под гипсами достигает иногда 17,25–18,60 м (Подороженское и Немировское месторождения), а в толще гипсов – 9,2 м (Загайпольское месторождение). На Тейсаровском месторождении толща гипс–ангидритов напоминает "слоеный пирог": вмещающие гипс–ангидриты многократно переслаиваются сероносными известняками мощностью 0,4–4,0 м с промышленным содержанием серы. Переход сульфатных пород в карбонатные породы с серой прослеживается (в шлифах и по керну) в последовательности: ангидрит – гипс – кальцит + сера + целестин (реже барит).

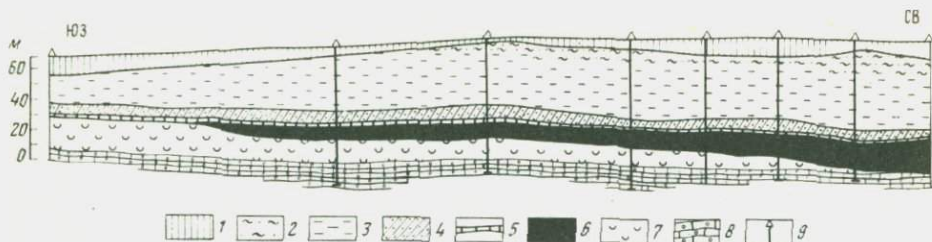
Метасоматическое преобразование гипс–ангидритов в серу и карбонат четко прослеживается в контактовых и приконтактных зонах карбонатных и сульфатных пород. Контактные плоскости, ограничивающие гипсы от сероносных известняков, обычно отсутствуют. Контактные зоны часто состоят из сероносной гипс–карбонатной породы. Гипсы здесь сохраняются в крупных или мелких реликтовых включениях с расплывчатыми контурами и постепенно замещаются карбонатом и серой. Нередко видна волокнистая сера, сохраняющая структуру селенита. В таких зонах удается под микроскопом в шлифах проследить стадийность замещения. Это устанавливается по реликтовым остаткам ангидрита и гипса, а также по вторичным сульфатам (целестин), возникшим в первую стадию сульфатредукции. В последующую стадию указанные минералы замещаются кальцитом и серой, о чем свидетельствуют псевдоморфозы кальцита и серы по идоморфным кристаллам ангидрита, гипса, редко целестина. В сероносных известняках реликтовые остатки гипса сохраняются в крупных или мелких монокристаллах, замещенных серой и карбонатом. В трещинах, испещряющих сероносные известняки, встречаются тончайшие пластинчатые образования серы по гипсу, частично или полностью замещающие его.

Рудным горизонтом месторождений серы являются вторичные сероносные известняки. По литологическому составу выделяются известняки, обломочно-глинисто-известняковые и глинистые руды. Основной литологический тип – известняковые руды, составляющие 85–95% всех типов руд. Среди известняковых руд по структурно-текстурным признакам выделяются вкрапленные, гнездово-вкрапленные, гнездово-прожилковые, полосчатые и брекчиевые разновидности, преобладает на всех месторождениях вкрапленная разновидность. Рудный горизонт по содержанию серы относится к числу выдержанных, но по мощности он, наоборот, невыдержан. Содержание серы в рудном горизонте для всех месторождений составляет в среднем 22–25%. В то же время мощность его на коротких расстояниях изменяется от нескольких десятков сантиметров до 25 м. Указанные свойства рудного горизонта также подтверждают его метасоматическое образование по гипс-ангидритам.

Существенное доказательство вторичного происхождения сероносных известняков по гипс-ангидритам – структурно-текстурная унаследованность серных руд от гипс-ангидритов. В керне серных руд видно, что слоистые и сланцеватые ангидриты переходят в волнисто-слоистые гипсы, а те в свою очередь замещаются серой и карбонатом. В них остается тот же ритм чередования тонких и тончайших прослоек, но место гипса занимают столь же мелкие и мельчайшие вкрапления серы и карбоната. Образованные по тонкослоистым гипсам сероносные известняки – это тонко- и мелковкрапленные серные руды, широко распространенные на серных месторождениях. Массивные вкрапленные серные руды образовались по массивным гипсам средне- и крупнокристаллической структуры. Гнездовые и гнездово-вкрапленные серные руды возникли по гипсам пятнистой текстуры, в которых крупные и мелкие изометричные включения белого гипса замещены карбонатом и восковидной скрытокристаллической серой.

Важное подтверждение вторичного образования серы и карбонатов по сульфатам – унаследованная мощность вторичных сероносных известняков от гипс-ангидритов (см. рисунок). Мощность вторичных сероносных известняков, где процесс замещения гипсов карбонатом и серой полностью закончен, всегда отвечает общей мощности гипс-ангидритов. Такое полное замещение гипсов вторичными известняками отмечается на локальных участках месторождений вдоль западной границы распространения сульфатных пород в полосе, граничащей с Предкарпатским сбросом, или вдоль крупных флектур в приподнятых и опущенных крыльях, осложненных складчатостью второго порядка, либо в ослабленных, структурно слабовыраженных зонах, а также вдоль других продольных и поперечных нарушений восточнее Предкарпатского сброса. С этими участками связана максимальная мощность рудного горизонта.

С удалением от перечисленных структур замещение гипсов становится избирательным – сероносные известняки наблюдаются преимущественно в кровле, реже в почве или, как на Тейсаровском месторождении, в многократных прослоях в толще сульфатов. На таких участках мощность известняков и мощность оставшихся незамещенными гипс-ангидритов в сумме отвечает общей мощности гипс-ангидритового горизонта.



Замещение гипс-ангидритов вторичными сероносными известняками, Язовское месторождение (составил Г.Т. Саксеев)

1 - суглинки, супесь, пески, галечники (четвертичные отложения); 2 - глины песчанистые (нижнесарматский подъярус); 3 - глины известковистые аргиллитовидные; 4 - песчаники (верхнетортонский подъярус, косовская свита); 5 - известняки (тирасская свита, ратынский горизонт); 6 - известняки сероносные; 7 - гипс-ангидриты (тирасская свита, днестровский горизонт); 8 - известняки литотамниевые (нижнетортонский подъярус, нараевский горизонт); 9 - скважины

Частичное или полное замещение сульфатных пород карбонатными связано с повышенной трещиноватостью и кавернозностью подстилающих пород и гипс-ангидритов вдоль пликативных и дизъюнктивных структур и с пластичностью покрывающих глинистых отложений. Трещиноватость и пустотность, вероятно, были путями проникновения жидких или газовых углеводородных растворов, возможно сероводорода, вызвавших преобразование сульфатов в карбонат и серу. Унаследованная мощность вторичных известняков от гипс-ангидритов была давно подмечена на многих месторождениях серы, но ей не находили удовлетворительного истолкования.

Вторичное происхождение сероносных известняков по гипс-ангидритам и генетическое отличие их от первичных известняков подтверждается исследованиями изотопного состава углерода карбонатов. По соотношению  $C^{12}/C^{13}$  карбонатные породы Предкарпатья подразделяются на две группы. К первой группе относятся известняки г. Ратын и отвечающие им аналоги - надгипсовые известняки из обнажений Предкарпатья и за контурами серных месторождений. Это "утяжеленные" известняки с  $\sigma C^{13} = +0,2 - 2,7\%$ . Вторую группу составляют сероносные известняки, которые в отличие от известняков первой группы, содержат более "легкий" углерод с  $\sigma C^{13} = -3,2 - 6,5\%$ . По результатам изотопных исследований видно, что известняки первой группы относятся к первичным (седиментационным) карбонатам. Известняки второй группы метасоматические, образовавшиеся по гипс-ангидритам при участии биогенного углерода, обогашенного изотопом  $C^{12}$ . Это подтверждается сравнением соотношений  $C^{12}/C^{13}$  углерода природного газа нефтегазовых месторождений Советского Союза (по Э.М. Галимову), в которых  $\sigma C^{13} = -3,2 - 7,0\%$ , с соответствующими данными по углероду карбонатов пред-

карпатских месторождений серы ( $\sigma C^{13} = 3,2-6,5\%$ ). Наблюдаемое совпадение отношений  $C^{12}/C^{13}$  в нефтегазовых и серных месторождениях указывает на участие в серообразовании облегченного углерода, который в условиях Предкарпатья мог поступать в гипс-ангидриты в составе углеводородов из газовых месторождений, расположенных во внешней зоне Предкарпатского прогиба.

О генетической связи серы и сульфатов свидетельствует литологическая приуроченность серных месторождений к гипс-ангидритам, структурная – к разрывным нарушениям. Вторичные сероносные известняки, образующие серные залежи на фоне широкого развития гипс-ангидритов, занимают в них лишь узкую полосу вдоль западной границы распространения. Западная граница гипс-ангидритов в платформенной части бассейна контролируется восточной границей зоны Предкарпатского сброса, почти в деталях повторяя ее простираение. Кроме того, вторичные сероносные известняки и связанные с ними серные месторождения открыты в гипс-ангидритах вдоль других нарушений северо-западного простираения восточнее Предкарпатского сброса. В результате двойного контроля (литологического и структурного) месторождения серы размещены в гипс-ангидритах в виде прерывистой цепочки вдоль Предкарпатского сброса и других нарушений северо-западного простираения.

Основной региональной структурой, с которой связано большинство месторождений серы, является Предкарпатский сброс. На приподнятом крыле этого сброса (на платформе) находятся Немировское, Язовское, Любеньское, восточная часть Гуменешкого, западная часть Тейсаровского, Подорожненское месторождения и Лисецкое серопроявление. В структурной зоне Предкарпатского сброса расположены Сорокское, западная часть Гуменешкого месторождения и Вербижское серопроявление. С системой Предкарпатского сброса и Городенковским поперечным нарушением связано Загайпольское серное месторождение.

Не менее существенное значение имели другие нарушения, развитые на платформе восточнее Предкарпатского сброса. К Язово-Развадовскому нарушению тяготеют Крупское серопроявление, восточная часть Тейсаровского и Журавненское месторождения; к Соколовскому и Тлумачскому сбросам – Тлумачское месторождение; к Журавненскому и Покровскому нарушениям – Жидачевское месторождение. С сопряжением двух складчатых структур северо-западного и северо-восточного простираения связано Роздолское месторождение.

Наблюдаемые геологические явления лучше всего объяснимы с позиций теории метасоматического образования серы и карбонатов по гипс-ангидритам.

Какова же была гидрогеологическая обстановка, сопровождающая преобразование гипс-ангидритов в карбонаты и серу? Серообразованию предшествовал, вероятно, подготовительный период, когда сульфатно-карбонатная толща тирасской свиты, представляющая собой в нормальном залегании плотную водонепроницаемую породу, оказалась дислоцированной с образованием ослабленных водопроницаемых зон в местах разрывов, сжатий, дроблений на флексуорообразных перегибах и в зонах разрывных нарушений. Ратынские известняки, покрывающие сульфатные отложения, и подстилающие их нижнетортонские известняки или меловые

известняки и песчаники подвергались более интенсивному по сравнению с сульфатной толщей дроблению, благоприятному для образования водоносного горизонта. Циркулирующая вода в сульфатных породах могла способствовать залечиванию трещин вторичным гипсом (селенитом), что часто наблюдается в разрезе гипс-ангидритовой толщи.

Основное питание водоносного горизонта ратынских известняков осуществлялось за счет более водообильного подгипсового горизонта с юго-западного края платформы в местах выклинивания гипс-ангидритов (водоупора) и в значительной степени через ослабленные дроблением зоны гипс-ангидритов. Замедленный водообмен в ратынских известняках с привнесением по тектоническим нарушениям из прогиба углеводородов, возможно также и хлор-натриевых вод, увеличивающих растворимость сульфатов, способствовал процессу редукции гипса с образованием сероводорода в зоне контакта ратынских известняков и сульфатных пород. Поступающие в эту зону кислородсодержащие воды из подгипсовых горизонтов окисляли сероводород до свободной серы, которая отлагалась на месте растворенных сульфатов совместно с образовавшимся кальцитом. В ослабленных дроблением зонах, где обменный процесс более интенсивный, вся толща гипсов замещена, как правило, сероносными известняками. Часто наиболее водообильна контактная зона осерненных известняков и гипс-ангидритов, гипсы здесь закарстованы. Вероятно, в подобных зонах в сульфатных породах окислительно-восстановительные процессы с образованием карбонатов и серы проходят и на современном этапе.

Установленные закономерности нужно рассматривать в совокупности как составные звенья единого процесса формирования месторождений серы, лучше всего объяснимого с позиций инфильтрационно-метасоматического образования серы и карбонатов по гипс-ангидритам.

Исходя из этих закономерностей, поисково-разведочные исследования на серу нужно продолжать в платформенной части бассейна вдоль Предкарпатского сброса и других продольных и поперечных нарушений, расположенных восточнее его. Одновременно нужно искать новые месторождения серы в недостаточно еще изученных участках северо-восточной части внешней зоны Предкарпатского прогиба.

Следует обратить внимание на площади Малая Горожанка и Коломыйский блок, расположенные в структурной зоне Предкарпатского сброса. Кроме поисково-разведочных работ необходимо изучение условий образования серы и формирования ее месторождений как теоретически, так и путем эксперимента.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ГЕНЕЗИС, МЕТОДИКА ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ СРЕДНЕАЗИАТСКОЙ СЕРОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

В результате анализа геологических условий размещения и строения среднеазиатских месторождений серы определились следующие главные рудоконтролирующие факторы.

В региональном и локальном плане осернение в первую очередь контролируется дизъюнктивной тектоникой. Сероносные бассейны и районы располагаются по окраинам древних и молодых платформ и в передовых прогибах. С этими же мобильными геотектоническими областями связано развитие углеводородов, сероводорода и галогенных формаций, что указывает на наличие пространственно-генетической их связи.

Месторождения серы и площади распространения сероводорода в Средней Азии контролируются субширотными зонами разломов древнего герцинского заложения, проявившихся как в складчатом основании, так и в осадочном чехле. Эта закономерность подтверждена открытием серы в сочленении Байсун — Кугитанга и на Ходжаикане. По отношению к разломам выделяются месторождения надразломные, приразломные и удаленные от разломов. Серные залежи в большинстве месторождений контролируются также разломами подчиненного порядка.

Сероносные структуры дифференцируются на более мелкие. Для структур Юго-Западного Гиссера на примере Тюбегатана намечается двухъярусное строение и разворот верхнего этажа на  $90^{\circ}$  относительно нижнего.

Для серных месторождений характерна связь осернения с неотектоникой. В четвертичном периоде структуры Гиссарского хребта испытали стабильный подъем: Тюбегатан на 250 м, Южный Кугитангтау — на 400–430 м и Гаурдак примерно на 400 м. Подъем был непрерывный с тремя остановками, в процессе которых формировались древние бассейны эрозии.

Серные залежи на Гаурдаке наращивались не сверху, как это предполагалось, а снизу, многократно в стадии активизации неотектонических восходящих движений, которые продолжают в этом районе и в настоящее время.

Наравне с дизъюнктивной тектоникой осернение контролируется и геоморфологическими факторами. Серные залежи тяготеют к эрозионным врезам, что указывает на участие в серообразовании атмосферного кислорода. Относительно эрозионных окон выделяются залежи подэрозионные, приэрозионные и удаленные от эрозионных окон.

Анализ литологических разрезов продуктивных пород приводит к следующим выводам: а) во фронте серообразования всегда идут сернокислые растворы; б) серообразование происходит в структурно-геохимических ловушках с предварительным растворением пород; в) при малых напорах рудообразующих растворов осернение в первую очередь разви-

ваются по породам-сорбентам и по наиболее пористым зонам; г) самородная сера не имеет строгого литологического контроля, хотя главная ее масса концентрируется в сульфатно-карбонатных породах; д) в сульфатах осернение развивается только при больших напорах рудообразующих растворов.

В связи с широко развитым растворением пород на сероносных структурах выделяется три категории карста: 1) поверхностный - в гипсах; 2) глубинный - в ангидритах, известняках и серных рудах; 3) мелкая пористость руд.

Комплексное изучение газо-гидрогеохимических условий показывает:

а) главная масса сероводорода на месторождениях серы имеет ювенильное, или фреатическое (по В.И. Вернадскому), происхождение;

б) хлоридно-натриевые воды приобретают ион  $SO_4^{2-}$  на больших глубинах за счет растворения сульфатных пород, но главная его масса в вертикальном разрезе наблюдается у поверхности над серными залежами и обязана конечному скислению сероводорода. В сульфатоносных разрезах за контуром серных залежей в водах преобладает ион  $HCO_3^-$ ;

в) сера образуется за счет окисления сероводорода атмосферным кислородом, поступающим в зону серообразования с инфильтрационными или артезианскими водами. В последнем случае серные залежи могут быть на глубинах до нескольких километров и контролируются не отметкой базиса эрозии, а размахом дизъюнктивной тектоники;

г) окисление сероводорода наиболее эффективно протекает при отношении его к кислороду 2:1 и 2:3. В первом случае образуется сера, а во втором  $H_2SO_3$ . До и после этого барьера взаимодействие  $H_2S$  и  $O_2$  протекает замедленно. Этот барьер характеризуется дефицитом  $O_2$  (до 70% и больше);

д) геохимическая среда рудообразующих растворов определяется главным образом изменением валентности серы по мере увеличения роли кислорода. В связи с этим на месторождениях серы выделяются пять газо-гидрогеохимических зон: дорудная, предрудная, рудная, надрудная и пострудная.

Изучение метасоматических руд гаурдакского типа показывает следующее: серообразование по ангидритам развивается с предварительным их растворением, но без фронтальной гипсофикации (т.е. гидратации); объемы вещества до и после серообразования далеко не равны, что указывает на большой вынос элементов; сера и кальцит - минералы взаимодополняемые, и в сумме занимают 90% объема замещаемых ангидритов, составляя по весу в руде 90-95%, реже меньше - до 76%; процессы серособразования совершаются циклически в тесной связи с активизацией неотектонических движений. В связи с этим в серных рудах наблюдается до двух-четырех генераций серы и кальцита, до трех генераций целестина и других парагенных минералов. При повторных циклах рудогенеза кальцит растворяется, на его место откладывается сера и вновь кальцит, что приводит к обогащению руд.

На месторождениях серы зафиксировано около 90 минералов, из них на среднеазиатских месторождениях - 70.

Геологические условия размещения и строения месторождений серы и природных газов, содержащих сероводород, свидетельствуют о том,

что на месторождениях самородной серы сероводород имеет глубинное ювенильное (фреатическое, по В.И.Вернадскому) происхождение.

В зоне взаимодействия с кислородом инфильтрационных или артезианских вод сульфидная сера меняет свою валентность в последовательности:



Для формирования месторождений серы необходимы условия, возникающие при взаимодействии соединений серы с противоположными знаками валентности, т.е. сероводорода с сернистой или серной кислотой.

Серообразование совершается в два этапа. На первом этапе сероводород в зоне взаимодействия с кислородом окисляется до сернистой кислоты, которая при миграции растворов снизу вверх разлагает кальцит и полевые шпаты пород. На втором этапе новые порции сероводорода окисляются сернистой кислотой до самородной серы. Поскольку кристаллическая сера практически не растворима в слабо сернокислой среде, то при многократном поступлении сероводорода серные руды обогащаются. Поэтому содержание серы в метасоматических рудах колеблется в широких пределах.

При образовании серы по сульфатным породам углеводороды необходимы, причем предпочтительны менее энергоёмкие высшие гомологи метана. Глубинные рассолы, содержащие сероводород и углеводородные газы, внедряясь в ангидриты, растворяют их. Смесь газов и растворенных солей может находиться без взаимодействия сколько угодно времени, что наблюдается на месторождениях сероводородно-углеводородных газов Уртабулак и др. Химические реакции не начинаются только в случае поступления в этот рудообразующий раствор свободного кислорода.

В соответствии с геологическими особенностями размещения, строения и формирования месторождений серы предлагается новая их генетическая классификация (табл. 1). В ее основу положены первоисточник серы, химизм и место его преобразования в самородную серу, а также факторы, влияющие на серообразование, характер осернения и формы залежей.

Геологоразведочные работы предлагается проводить в три стадии: мелкомасштабный (региональный) прогноз, крупномасштабные прогнознопойсковые работы и разведка месторождений (табл. 2).

Что касается геофизических методов при поисках и разведке месторождений самородной серы, то они до настоящего времени используются крайне ограниченно. Это обусловлено тем, что минералы серных руд и породы, вмещающие серные залежи, характеризуются близкими физическими свойствами. Они диамагнитны, не радиоактивны, имеют близкий удельный вес и являются диэлектриками, что затрудняет выделение в разрезе аномалий или опорных горизонтов.

Наряду с этим серные залежи обладают рядом физико-химических условий, благоприятных для применения геофизических методов:

1. Серные руды обладают пористостью, в порах содержатся высокоминерализованные электропроводящие растворы, поэтому обводненные серные залежи обладают низкоомностью по сравнению с вмещающими породами.

Генетическая классификация месторождений самородной серы

Категория месторождений	Группы и подгруппы месторождений. Исходное вещество и химизм его преобразования в самородную серу	Характер сероотложения		Формы серных залежей	Минералогический тип руд	Промышленное значение	Геотектонические области развития	Положение залежей относительно	
		Тип	Подтип					разломов	эрозионных врезов
Эндогенные	I. Конденсационные - из газообразной и жидкой серы: S газ., жид. → S кристаллич.	Заполнения	Сера образуется вне полостей отложения и приносится в них в виде газа или растворов	Жилы, гнезда, включения, неправильные тела, серные потоки	Чистая сера, возможно, с обломочным материалом	Небольшие месторождения вулканических областей.	Области вулканической деятельности	Прикратерные	Приэрозионные
Гипергенные	II. Гидрогенные А. Из сероводорода $2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2H_2SO_3$ ; $H_2SO_3 + 2H_2S \rightarrow 3S + 3H_2O$ Б. Из сульфидов $MS_2 + 2O_2 \rightarrow MSO_4 + S$	Выполнения	Сера образуется и кристаллизуется в полостях		Чистая сера, чаще с кальцитом, реже с гипсом. Чистая сера, чаще с гипсом, реже с кальцитом	Большие, но не промышленные накопления в ареале гипергенных месторождений	Вулканические области, окраины платформ, передовые прогибы, впадины	Прикратерные, надразломные, часто удаленные от разломов	Приэрозионные, подэрозионные, часто удаленные

Гипергенные	III. Гидрогенно-метасоматические А. Из сероводорода $2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2H_2SO_3$ $H_2SO_3 + 2H_2S \rightarrow 3S + 3H_2O$ Б. Из сероводорода и сульфатов $H_2S + nO_2 + C_nH_m + MSO_4 \rightarrow$ $\rightarrow C + CO_2 + nH_2O + MCO_3 + 2S$	Замещения	Вулканогенно-осадочных пород Карбонатных, обломочных, глинистых пород	Пластовые и линзовидно-пластовые образные неправильной формы	Сера с кварцитом.	Главные промышленные месторождения	Вулканические области	Приразломные	Приэрозионные, редко подэрозионные, часто удаленные
			Сульфатных пород		Линзовидные и неправильной формы				
Экзогенные	IV. Окисление и метаморфизация серосодержащих углеводородов  Биогеохимическое разложение органического вещества	Остаточные	Залежи серы проблематичны						

Таблица 2

Стадии геологоразведочных работ на самородную серу

Стадия	Этап	Содержание работ	Содержание материалов
Мелкомасштабный (региональный) прогноз	Составление мелкомасштабных прогнозных карт в провинциях	Анализ региональных предпосылок и признаков сероносности. Выделение сероносных регионов, бассейнов, районов	Тектоническая карта фундамента. Литолого-фациальные карты. Структурно-тектонические карты чехла. Карта размещения углеводородов и сероводорода. Карта прямых и косвенных признаков
	Составление среднемасштабных прогнозных карт в регионах, бассейнах	Анализ геологических предпосылок и признаков сероносности в масштабе региона, бассейна. Полевые реви-зионные работы на перспективных площадях. Завершение прсгнозной карты и написание отчета	Геологическая карта. Тектоническая карта фундамента. Структурно-тектонические поэтажные карты чехла. Карта литохимической изменчивости продуктивных свит. Карта размещения углеводородов и сероводорода. Карта раскрытости структур (эрозисного среза). Карта освоенности структур. Гидрохимическая карта поверхности продуктивных горизонтов. Карта новейшей тектоники. Карта прямых и косвенных признаков сероносности. Крупномасштабные карты-врезки перспективных структур
Крупномасштабные прогнозно-поисковые работы	I. Предполевой	Заготовка карт. Дешифрирование аэрофотоснимков. Составление морфометрических карт	Геологическая карта. Комплекс геологических разрезов. Литологическая корреляция разрезов. Геоморфологическая карта.
	II. Полевые поисковые работы	Геологическая съемка. Структурно-тектоническое картирование. Газово-химическое опробование.	Карта неотектоники и профили базисов эрозии. Карта дешифрирования аэрофотоснимков. Морфологическая карта и профили. Газово-гидрохимическая карта. Карта закарстованности. Карта геофизических аномалий.

Стадия	Этап	Содержание работ	Содержание материалов
		Литохимическое опробование и корреляция разрезов. Геоморфологическое и неотектоническое картирование. Выявление и описание прямых и косвенных признаков. Комплексные геофизические исследования. Биогеохимические исследования	Карта прямых и косвенных признаков. Карта перспективных площадей на структурной тектонической основе по маркирующему горизонту
		Параметрическое бурение	
		Оконтуривание аномалий геофизическими методами	
		Заверочное разбуривание 30% аномалий	
Разведка месторождений	Предварительная разведка	Заверочное разбуривание всех аномалий единичными скважинами в комбинации с геофизическими методами в скважинном варианте. Подтверждение аномалий и оценка параметров сероносности. Предварительное выяснение горно-технических условий и технологических типов руд	
	Составление геолого-экономического обоснования		
	Детальная разведка	Оконтуривание серных залежей бурением. Подсчет запасов. Опытные работы по подземной выплавке.	

2. Серные залежи обычно в нижней части обводнены и имеют восстановительную сероводородную среду, а в верхней части окислены. Наличие сред с противоположным электрохимическим потенциалом так же, как и на сульфидных месторождениях, должно обусловить развитие естественного электрического поля.

3. Процесс образования серы из сероводорода — это экзотермический процесс окисления. Следовательно, в зоне окисления сероводорода и серы должны наблюдаться не только электрохимические потенциалы, но и аномальный разогрев пород.

4. Среди минералов, парагенных сере, встречаются рассеянные сульфиды и карбониды (шунгит, антраксолит), обладающие поляризуемостью, что должно отличать серные руды от вмещающих пород.

5. На месторождениях серы широко развит карст, а сами серные залежи контролируются дизъюнктивными трещиковатыми и обводненными зонами.

Все эти особенности месторождений серы позволяют рекомендовать применение для их поисков следующие методы электроразведки: сопротивления (ВЗЭ, профилирование), заряженного тела, эквипотенциальных линий, радиоволнового просвечивания, индуктивной электроразведки, естественных потенциалов, вызванной поляризации, термометрии.

Методы сопротивлений (ВЗЭ) применялись на Гаурдакской и Тюбегатанской структурах и дали хорошие результаты. Остальные методы требуют постановки опытных работ. На среднеазиатских месторождениях серы широко развиты процессы новейших движений земной коры. Как выявлено сейсмической станцией г. Ташкента, в участках наибольшего локального напряжения создаются положительные магнитные аномалии, которые исчезают после снятия (разрядки) напряжения (землетрясения). В связи с этим живущие разломы на месторождениях серы, возможно, также обладают аномальной магнитностью, что требует проверки путем режимных магнитных наблюдений.

В сравнении с буровыми скважинами, которые фактически освещают участок площадью в несколько квадратных сантиметров, геофизические методы более информативны, особенно на стадии предварительного поиска, что весьма перспективно для повышения геолого-экономической эффективности поисков месторождений серы, особенно в закрытых районах.

В 1958–1962 гг. на Тюбегатане были проведены поиски серы методом геологической съемки в масштабе 1:25 000 с бурением 37 скважин. Однако контролирующие факторы, необходимые для оценки перспектив сероносности, исходя из вышеизложенных генетических представлений, практически остались не выявленными. В связи с этим в 1967–1968 гг. выполнен дополнительный комплекс полевых исследований: уточнены геологические условия; произведено структурно-тектоническое, геоморфологическое и неотектоническое картирование; сделано газогидрогеохимическое опробование водопунктов; проведена корреляция и литохимическое опробование разрезов продуктивных пород, сделаны минералогические наблюдения и др.

После обработки материалов и сопоставления их с данными по Гаурдакской структуре выяснилось следующее: 1) по современной газогидрогеохимической обстановке Тюбегатан аналогичен Гаурдаку; 2) структура Тюбегатана, как и Гаурдака, раскрылась в конце неогена. На протяжении всего четвертичного периода здесь могло происходить серообразование, причем основная роль в нем принадлежит артезианским водам; 3) из парагенных минералов были зафиксированы сульфиды, полисульфиды, карбониды, кремни, целестин, вторичный гипс, лимонит.

Самородная сера типа выполнения встречена в двух пунктах на поверхности и в 23 скважинах в различных частях структуры. Эти данные свидетельствуют о наличии на Тюбегатане промышленной сероносности. Приближенные расчеты по дебиту родника показывают, что за 1 млн. лет на Тюбегатане могли накопиться большие запасы серы.

Цифра вынесенного сероводорода косвенным образом подтверждается количеством размытых солей. Мощность солей, размытых за четвертичный период на Тюбегатане, составляет 280 м, что близко к амплитуде подъема структуры за этот период, установленной по древним террасам.

В результате дифференциации структуры Тюбегатанского месторождения на ряд куполов-блоков были выделены площади локализации ожидаемых серных залежей. В качестве перспективных выявлено девять площадей; наметить более узкие площади по имеющимся материалам не представлялось возможным, а поиски залежей гаурдакского типа в выделенных зонах бурением требовали больших затрат.

Автором статьи было разработано геологическое обоснование к применению геофизических поисков (Горбачев, 1969), которые были выполнены на северо-западном крыле структуры в 1969-1970 гг. методом ВЗЭ и выявили ряд низкоомных аномалий. На трех аномалиях в 1970 г. пройдено пять единичных скважин, встретивших прожилковое осернение и подтвердивших повышенную трещиноватость и обводненность пород. Небольшие серные тела эти скважины могли пропустить.

Для завершения оценки Тюбегатанской структуры необходимо детальное оконтуривание аномалий как в поперечном направлении, так и по простиранию. После этого 25-30% аномалий следует проверить бурением по двум профилям скважин на каждую аномалию.

Определение перспектив сероносности Средней Азии проводилось неоднократно. Так, А.С. Уклонский (1940) оценил перспективы Среднеазиатской провинции равными провинции побережья Мексиканского залива.

Среднеазиатскую сероносную провинцию впервые выделил А.С. Соколов. Северная граница ее проводилась по линии Красноводск - юг Аральского моря - р. Сырдарья. В качестве наиболее перспективных выделялись несколько площадей: Западно-Туркменская впадина, Предкопетдагский краевой прогиб, окраины Ферганской межгорной впадины, а также Яванская, Кулябская и Сурханская депрессии Южно-Таджикской впадины и Гаурдак-Кугитангский район.

В 1964 г. А.И. Отрешко сделал попытку уточнить границы провинции, проведенные А.С. Соколовым. Северная граница была установлена им от Красноводска на север Аральского моря и затем по р. Сырдарье. При этом границы сероносных районов, выделенных А.С. Соколовым, практически не претерпели изменений.

В 1966 г. в связи с получением новых геологических материалов (Горбачев, 1968) границы Среднеазиатской сероносной провинции были уточнены, в ее пределах выделены сероносные регионы, а в их контурах - наиболее перспективные площади (районы и бассейны).

Сероносные провинции целесообразно, вероятно, выделять, исходя из регионального геотектонического районирования территории. В Средней Азии и Казахстане следует выделить самостоятельную сероносную провинцию в пределах контуров Туранской платформы, включив сюда Предкопетдагский краевой прогиб и эпиплатформенную подвижную область Тянь-Шаня. За пределы этой территории осернение с небольшими перерывами распространяется на северо-запад и север через Прикаспийскую солянокупольную зону в Восточно-Европейскую провинцию и на северо-восток через Тургайские ворота в Западно-Сибирскую низменность.

Если принять, что сероводород имеет глубинное происхождение, есть все основания предполагать возможность серообразования также и на площади выходов пород фундамента в западных отрогах Тянь-Шаня, тем более что в толще карбона в Чаткальском и Кураминском хребтах зафиксированы пласты ангидритов. Нельзя считать бесперспективным на самородную серу и Памир, где широко развиты сероводородные источники. Возможны открытия небольших месторождений вулканического типа во внешних зонах Альбурса и Копетдага.

На втором этапе прогнозирования встает вопрос выделения более мелких сероносных площадей — регионов, бассейнов или районов.

Исходя из региональных факторов сероносности (структурно-тектонического строения провинции, развития сульфатно-карбонатных комплексов, распространения углеводородов и сероводорода, размещения месторождений и проявлений серы и парагенных минералов) в Средней Азии определилось пять сероносных регионов: Западно-Туркменский (верхняя юра-неоген); Устюртский (неоген-средний миоцен); Амударьинский (верхняя юра, палеоцен); Ферганский (палеоген и льяканская свита мела); Чуйский (девон, карбон, пермь, неоген).

В пределах этих регионов наиболее перспективны зоны развития крупных (главным образом субширотных) разломов, своды поднятий, осложненные тектоникой, и переходные наиболее напряженные зоны крупных поднятий и прогибов.

В таком виде прогнозная оценка Среднеазиатской сероносной провинции является основой для направления более детальных прогнозно-поисковых работ среднего масштаба отдельно для каждого сероносного региона.

По Ферганскому региону составлена прогнозная карта сероносности; регион на большей территории хорошо изучен и опоскован, но ряд площадей целесообразно изучить дополнительно по мере получения по ним новых геологических материалов.

В 1973 г. будет завершено составление прогнозных карт по Устюртскому и Амударьинскому регионам УзССР. Здесь определился ряд перспективных структур и площадей, но они относятся к закрытому типу и эффективность поисков на них будет определяться освоенностью геофизических и других методов. Необходимо пополнить прогнозные карты по восточной части Амударьинского региона (Яванская и Кулябская депрессии), а также для туркменской и казахской территорий Устюртского региона и составить прогнозные карты по Западно-Туркменскому, южной части Амударьинского и Чуйского регионов.

Поисково-ревизионные работы целесообразно провести главным образом в трех районах: на юге Амударьинского региона, в юго-западных отрогах Гиссарского хребта и в Сурхандарьинской депрессии. Необходимо форсировать также поиски в районе Гаурдака, в первую очередь на самой Гаурдакской структуре и в Юго-Западном Кугитанге.

В Узбекистане необходимо закончить оценку Тюбегетана, участка Агитма, провести ревизию серопроявлений Южного Бабатага, западного крыла Байсун-Кугитанга, Ходжаипак, поиски на Шаргунской площади. Оценку сероносности Ходжайкана следует провести попутно с раз-

ведкой калийной и каменной солей, а ревизию серопроявления Шакарлык-Астана — попутно с предварительной оценкой целестина.

Ревизионно-поисковые работы необходимо провести также на Лянгарской, Кызылмазарской, Каттамайданской, Чакчарской, Хатакской и Бабатагской площадях.

Потенциальные ресурсы Среднеазиатской провинции достаточно велики. В СССР это наиболее крупная сероносная провинция, которая отличается многообразием литолого-стратиграфических продуктивных пород, большой площадью развития серопроявлений, благоприятными структурно-тектоническими и другими предпосылками и многообразием генетических типов месторождений серы. Наравне с небольшими залежами здесь возможно открытие месторождений серы крупных масштабов.

#### Литература

- Горбачев М.Г. Перспективы сероносности Средней Азии. — Труды Геол. ин-та, вып. 20. Казань, 1968.
- Горбачев М.Г. О применении геофизических методов на поисках месторождений самородной серы. — Разв. и охрана недр, 1969, № 9.
- Уклонский А.С. Парагенезис серы и нефти. Ташкент, Изд. Узбекского филиала АН СССР, 1940.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАСШИРЕНИЯ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ СЕРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ТУРКМЕНСКОЙ ССР

В геотектоническом отношении территория Туркмении представляет собой часть обширной эпигерцинской платформы юга СССР. В пределах республики выделяются три основные геотектонические области — альпийской геосинклинали, эпигерцинской платформы и эпиплатформенного орогена. Область альпийской геосинклинали охватывает Копетдагское складчатое поднятие, Большой Балхан и восточный борт Южно-Каспийской впадины, которые на севере сочленяются с Предкопетдагским и Северо-Балханским прогибами. Большую часть территории республики занимает эпигерцинская платформенная область, основными элементами которой являются Кубадаг-Карабогазовское поднятие, Туаркыр-Каращорская группа поднятий и прогибов, Центрально-Каракумский свод, Бахардокская моноклинал, Заунгузская впадина, Багаджинский выступ, Карабекаульский прогиб, Мургабская впадина, Бадхыз-Карабильская зона поднятий, Приамударьинская ступенчато-моноклиальная область, Бешкентский прогиб и Керкинская ступень. На севере и северо-западе располагаются Дарьялык-ДAUDАНский и Верхнеузбойский прогибы. Эпиплатформенная орогеническая область представлена складчатым поднятием юго-западных отрогов Гиссара и Кушкинской складчатой зоной.

В геологическом строении Туркмении принимают участие отложения палеозойского, пермо-триасового и мезо-кайнозойского возраста.

Палеозой представлен магматическими и метаморфическими породами, пермо-триас — терригенно-обломочными и туфогенными осадками. Нижний и средний отделы юрской системы повсеместно сложены песчано-глинистой толщей морских и континентальных отложений, верхний отдел выражен преимущественно карбонатными и лагунными соляно-гипсовыми образованиями. Для отложений нижнемелового возраста характерно развитие главным образом морских осадков, причем в нижней части разреза преобладают карбонатные породы, а в верхней — терригенные. Верхний мел в западных районах республики сложен терригенными и карбонатно-глинистыми осадками, в восточных районах — терригенными. Для отложений палеогена характерны морские осадки, в основном глины и мергели. В юго-восточных и восточных районах существенную роль играют известняки, известковистые песчаники, гипсы (палеоцен) и эффузивные породы (эоцен).

Неогеновые и четвертичные отложения представлены как морскими, так и континентальными, местами загипсованными осадками.

Все известные месторождения и проявления самородной серы Туркмении за исключением Западно-Туркменской низменности приурочены к следующим литолого-стратиграфическим комплексам:

1) сульфатно-карбонатным отложениям верхней юры — месторождения Гаурдакское, Карлюкское и др;

2) сульфатно-карбонатным осадкам нижнего палеогена (бухарские слои) – Мейлегеранское проявление на Бадхызе, Ходжабулакское и Душакское проявления в Восточном Копетдаге;

3) гипсоносным песчаникам неогена – группа каракумских месторождений и серопроявления Западного Копетдага и Краснодарского полуострова.

По данным А.С.Соколова (1959), А.И.Отрешко (1968), И.И.Алексенко (1967), Н.П.Юшкина (1968) и других исследователей геологических закономерностей размещения серных месторождений, территория Туркмении может рассматриваться как перспективная на серу. Однако перспективы различных районов неодинаковы. Здесь можно выделить три крупных сероносных бассейна (см. рисунок).

### Восточно-Туркменский сероносный бассейн

Сероносные и потенциально сероносные литолого-Стратиграфические комплексы сульфатно-карбонатных отложений верхней юры и палеогена прослеживаются на всей территории Восточной Туркмении и Западного Узбекистана. Районы, перспективные для выявления месторождений серы, приурочены к горноскладчатым обрамлениям платформы – юго-западным отрогам Гиссара и Кушкинской зоне поднятий, где сульфатно-карбонатные комплексы верхней юры (Гиссар) или палеогена (Гиссар, Кушкинская зона) выведены на дневную поверхность.

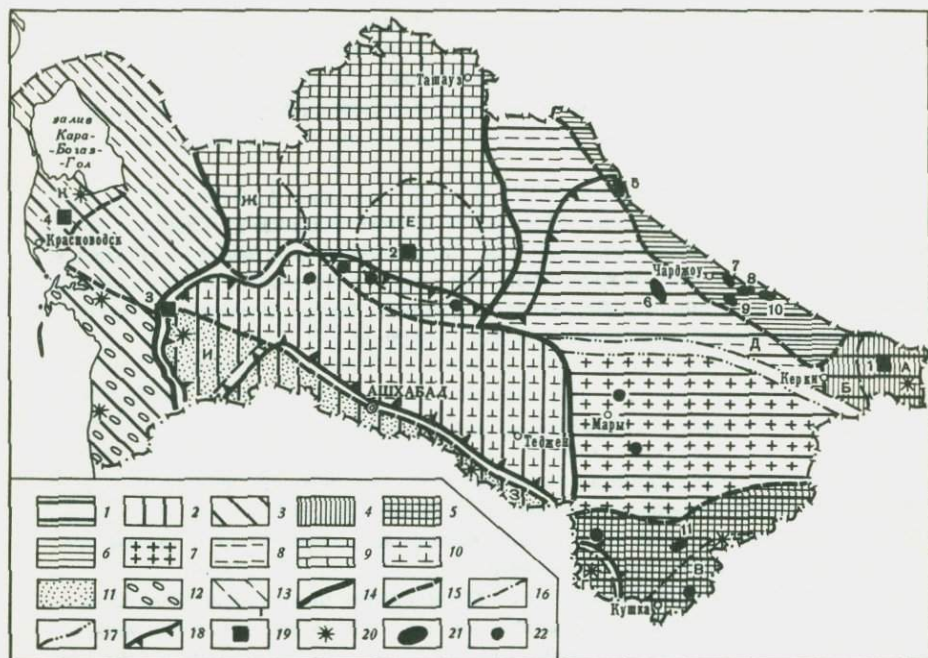
В пределах платформенной части бассейна перспективными следует считать зоны региональных разломов, с которыми связаны диапировые структуры (например Репетек-Келифская зона), где могут быть встречены месторождения самородной серы в кепроках соляных структур типа луизианских (США).

За последние годы на характеризуемой площади выявлены месторождения углеводородных газов, богатых сероводородом, в связи с чем необходима коренная переоценка площадей платформенной части бассейна, характеризующейся исключительно высокими перспективами нефтегазоносности.

На территории бассейна (в пределах Туркмении) выделены следующие сероносные области: Юго-Западного Гиссара, Приамударьинская, Мургабская, Заунгузская и Бадхыз-Карабильская.

Сероносная область Юго-Западного Гиссара, в свою очередь, подразделяется на три района: а) высокоперспективный Гаурдакский, б) перспективный Кугитангский, в) возможно сероносный Мукры-Керкидакский.

Гаурдакский сероносный район приурочен к одноименной брахиантиклинали, являющейся элементом Гаурдак-Тюбегатангского отрога Гиссара. В юго-западной части брахиантиклинали разведано Гаурдакское месторождение и ревизионно оценена остальная площадь Гаурдакской структуры. Перспективны для выявления новых крупных сероносных залежей площади, расположенные в зоне южной ветви Узункудукского разлома от г. Балахана до долины Кансая. Следует резко усилить поиско-



### Сероносные бассейны, области и районы Туркмении

1–3 – сероносные бассейны: 1 – Восточно-Туркменский, 2 – Центрально-Туркменский, 3 – Западно-Туркменский; 4–9 – сероносные области: 4 – Юго-Западного Гиссара, 5 – Бадхыз-Карабильская, 6 – Приамударьинская, 7 – Мургабская, 8 – Заунгузская, 9 – Центрально-Каракумская; 10–13 – возможно сероносные области: 10 – Южно-Каракумская, 11 – Копетдагская, 12 – Западно-Туркменской низменности, 13 – Карабогазская; 14–18 – границы: 14 – сероносных бассейнов, 15 – сероносных областей, 16 – сероносных районов, 17 – сероносных зон, 18 – предполагаемого распространения сероводорода в природных газах; 19 – месторождения самородной серы (1 – Гаурдакское, 2 – Каракумское, 3 – Шорджинское, 4 – Красноводское); 20 – проявления самородной серы; 21 – месторождения сероводородсодержащих углеводородных газов (5 – Гугуртли, 6 – Багаджа, 7 – Киштуван, 8 – Самантепе, 9 – Сакар, 10 – Мегеджан, 11 – Карабиль); 22 – проявления сероводородсодержащих газов.

Сероносные районы: А – Гаурдак-Кугитангский, Б – Зеагли-Дарвазинский; возможно сероносные районы: В – Мукры-Керкидагский, Г – Кушкинский, Д – Бадхызский, Е – Капланкыр-Карашорский, Ж – Восточно-Копетдагский, З – Западно-Копетдагский, И – Красноводский; К – Репетек-Келифская возможно сероносная зона

вые работы на площади V участка и на флангах других участков месторождения, имея в виду возможность отработки выявленных залежей как открытым способом, так и методом подземной выплавки серы (ПВС). Вероятно, запасы серных руд Гаурдакского месторождения можно увеличить в два, а в перспективе и в три раза по сравнению с разведанными.

Кугитангский сероносный район располагается в долине р. Кугитанг-Дарьи и приурочен к западному крылу одноименной антиклинали. В районе выявлено Карлюкское месторождение самородной серы, которое приурочено к известнякам горизонта "R", т.е. к верхам сероносной подсвиты гаурдакской сульфатно-карбонатной толщи юры. Многочисленные серопроявления выявлены на выходах сероносной подсвиты (Ходжакараул, Карлюк). Однако, несмотря на явные поисковые признаки в виде многочисленных серопоявлений ожидать в этом районе крупных сероносных залежей нет оснований из-за исключительно большой раскрытости Кугитангской структуры и наличия прадолины р. Кугитанг-Дарьи, что создает неблагоприятные гидрогеохимические условия для сохранения сероносных залежей. В настоящее время здесь можно выявить лишь останцы некогда мощных сероносных залежей (например Карлюкская, Ходжакараульская).

Мукры-Керкидагский возможно сероносный район приурочен к крыльям Мукрынской синклинали зоны, южной границей которой является р. Амударья, а северной Узункудукский разлом. Перспективы сероносности здесь связываются с сульфатно-карбонатным комплексом палеогена (бухарские слои), в котором имеются проявления серы и целестина.

Область Юго-Западного Гиссара, по-видимому, высоко перспективна и в отношении нефтегазоносности. Исходя из геохимической обстановки, месторождения углеводородных газов должны содержать высокий процент сероводорода. Поэтому наряду с продолжением поисково-разведочных работ на самородную серу необходимо в ближайшие годы организовать здесь поиски нефти и газа, в первую очередь на таких площадях, как Акайры, Тагара и др.

Приамударьинская сероносная область рассматривается в пределах Приамударьинской ступенчато-моноклиналиной зоны. Здесь перспективы обнаружения месторождений серы связаны с сульфатно-карбонатной толщей нижнего палеогена. В северной части Приамударьинского района, на Питняке, отмечается интенсивная разгрузка углеводородных газов, присутствие сероводорода в водах источников и налетов серы в руслах водотоков.

Главным источником получения элементарной серы и серной кислоты до настоящего времени являлись серные и сульфидные руды. В настоящее время серу в значительных количествах стали извлекать из природных газов, содержащих сероводород.

На территории Туркмении месторождения природных газов, содержащих сероводород, известны в характеризуемой области в пределах Чарджоуской тектонической ступени. Залежи приурочены к верхней части разреза глинисто-карбонатной толщи келловей - оксфорда, которая подстилается терригенными осадками ниже-среднеюрского возраста и перекрывается сульфатно-галогенными отложениями гаурдакской свиты

кимеридж-титонского возраста. Выявленные в известняках келловей - оксфорда газовые залежи газоконденсатные или имеют небольшую нефтяную оторочку и залегают на глубине от 1600 до 3000 м. Основной компонент газовой смеси - метан (81-95%). Содержание его гомологов колеблется от 0,9 до 6%. Концентрация азота в среднем небольшая и составляет 0,4 - 4%. Углекислого газа содержится 0,7 - 4,5%, сероводорода 0,2 - 3,8%. К числу месторождений сероводородсодержащих газов относятся Самантепинское, Гугуртлинское, Метеджанское и Киштуванское.

Самантепинское месторождение газа приурочено к западной части Денгизкульского вала и расположено в 60 км к юго-востоку от г. Чарджоу. Промышленная газоносность месторождения связана с известняками келловей - оксфорда, залегающими на глубине от 2340 до 2700 м. Содержание сероводорода в газе 2,2 - 3,5 %.

Гугуртлинское месторождение газа приурочено к западной части Гугуртли-Учкырского вала и находится в 165 км к северо-западу от г. Чарджоу. Месторождение многопластовое и содержит 10 продуктивных горизонтов. Сероводородсодержащая газовая залежь приурочена к карбонатной толще келловей - оксфорда, с которой связано около трети общих запасов месторождения. Глубина залегания этого продуктивного горизонта от 1683 до 2500 м. В составе газа содержится 0,15 - 0,20% сероводорода.

Киштуванское и Метеджанское месторождения газа располагаются на Чарджоуской тектонической ступени юго-восточнее г. Чарджоу, первое в 25-30 км, второе - в 60 км. Оба месторождения разведуются. Промышленные притоки газа были получены при опробовании известняков келловей - оксфорда. Газ месторождений метановый. Содержание сероводорода в газе на Киштуванском месторождении 0,22%, на Метеджанском - 3,8 - 4,5%.

Мургабская сероносная область охватывает площадь Мургабской впадины, Заунгузская сероносная область - Заунгузской впадины, Багаджинского выступа и Карабекаульского прогиба. В пределах указанных областей основные перспективы связаны с возможностью обнаружения месторождений сероводородсодержащих углеводородных газов в карбонатной толще келловей - оксфорда. В настоящее время здесь выявлено Багаджинское месторождение сероводородсодержащих газов и установлены их проявления на Байрамалийской и Южно-Иолотанской площадях.

Багаджинское месторождение газа расположено в 90-100 км к западу от г. Чарджоу и приурочено к антиклинальной складке в юго-восточной части Багаджинского выступа. Месторождение разведывается. Промышленные притоки газа получены из известняков келловей - оксфорда. Газ метановый с содержанием сероводорода до 0,26%.

Бадхыз-Карабильская сероносная область располагается в пределах одноступенчатой зоны поднятий. В юго-западной и юго-восточной частях области выделяются Бадхызский и Кушкинский сероносные районы. В Бадхызском районе известно Мейлегеранское проявление самородной серы, а в Кушкинском - Ходжагугурдагское. Оба проявления приурочены к сульфатно-карбонатным породам бухарского яруса. Вся территория

области перспективна с точки зрения обнаружения месторождений сероводородсодержащих газов в отложениях неокома. В последнее время здесь открыто Карабильское месторождение сероводородсодержащих газов.

На территории Туркмении прогнозные запасы газа, в составе которого возможно присутствие сероводорода, оцениваются по категории  $D_1 + D_2$  в количестве более 2 трилл. м<sup>3</sup>. Наибольшие потенциальные возможности нахождения крупных месторождений сероводородсодержащих газов имеют келловей-оксфорд-гаурдакский (сероносные области Юго-Западного Гиссара, Приамударьинская, Заунгузская и Мургабская) и верхнеюрско-неокомский (Бадхыз-Карабильская и Южно-Каракумская сероносные области, южная часть Центрально-Каракумской и отдельные районы Копетдагской сероносных областей) литолого-стратиграфические комплексы.

В связи с намечаемым в текущем пятилетии вводом в эксплуатацию газовых месторождений западных и восточных районов Туркмении газовые месторождения второго из них, содержащие сероводород, следует рассматривать как потенциальный источник увеличения ресурсов серы.

Репетек-Келифская возможно сероносная зона представляет разлом глубинного заложения, который прослежен от района станции Келиф на востоке до Центрально-Каракумского свода на западе. Перспективы сероносности в восточной части зоны связаны с солянокупольными структурами, где возможны серные месторождения в кепроках соляных куполов. В первую очередь здесь необходимо проверить наличие кепроков, что в значительной мере предешит перспективность подобных площадей (Донгузсырт, Шальгиричбаба).

### Центрально-Туркменский сероносный бассейн

На территории бассейна выделяются следующие сероносные области: Центрально-Каракумская, Южно-Каракумская и Копетдагская.

Центрально-Каракумская сероносная область охватывает Центрально-Каракумский свод, северную группу поднятий и прогибов, Верхнеузбойский прогиб и Капланкыр-Карашорскую группу поднятий и прогибов. В пределах области располагаются Зеагли-Дарвазинский сероносный район и Капланкыр-Карашорский возможно сероносный район.

Зеагли-Дарвазинский сероносный район охватывает юго-восточную часть Центрально-Каракумского свода. В районе располагается Каракумское месторождение серы, которое приурочено к Зеагли-Дарвазинской эрозионно-тектонической зоне. Месторождение представлено своеобразными сероносными бутрами — останцами отложений заунгузской свиты плиоцена. Бутры каравееобразной формы или в виде штока площадью от десятка до сотен метров имеют следующее строение. Центральная часть сероносного бутра обычно представлена гипсовым штоком высотой 8—10 м (Горбачев, 1968); вокруг гипсового штока развиты наиболее богатые серные руды (25% серы), представленные белыми кварцевыми песчаниками заунгузской свиты с серным цементом. Песчаники подстилаются глинами, мергелями и известняками сармата. Сероносные бутры,

как правило, располагаются над сочленениями или на пересечении разрывных нарушений, весьма характерных для Зеагли-Дарвазинского района.

Геология Каракумского серного месторождения изложена в работах многих авторов (Нашкий, 1926; Ферсман, 1926; Данов, 1931, 1936; и др.) Геологоразведочные и другие работы по изучению сероносности этого района прекращены в 1961 г. в связи с ликвидацией Каракумского серного завода.

В настоящее время отношение к этому интереснейшему району должно быть пересмотрено в связи с рядом обстоятельств:

1. В пределах района разведаны месторождения газа, в конце текущей пятилетки предполагается строительство автодороги Ашхабад — Ташауз, т.е. экономические условия района изменяются в благоприятную сторону.

2. Получает развитие новый способ добычи серы (ПВС), применение которого не требует больших капитальных затрат, и по мере его усовершенствования появится возможность обрабатывать серные бугры этим методом.

3. Перспективы района позволяют поставить поисковые работы с целью резкого увеличения запасов серы.

Капланкыр-Карашорский возможно сероносный район охватывает одноименную группу поднятия и прогибов. В его пределах перспективными на серу могут быть осадки неогенового возраста. По рассказам местных жителей, северо-восточнее колодца Демме (или Демпе) находится месторождение серы.

Южно-Каракумская возможно сероносная область охватывает Бахардокскую моноклинальную зону и Предкопетдагский прогиб. Перспективы этой территории связаны с возможным обнаружением месторождений сероводородсодержащих газов в отложениях верхнеюрско-неокомского возраста; проявления газов установлены на площади Казы и в сопредельной Центрально-Каракумской области (Модар, Южный Тамдырли, Восточный Ербент).

Копетдагская возможно сероносная область рассматривается нами в границах Копетдагского складчатого поднятия. В пределах области выделяются Восточно-Копетдагский и Западно-Копетдагский возможно сероносные районы.

На площади Восточно-Копетдагского района известны Ходжабулакское и Душакское проявления серы. Первое из них расположено в 20 км к югу от станции Душак и в 15 км к юго-востоку от устья р. Душак. По данным В.В. Александрова, осернение приурочено к гипсоносной толще палеоцена. Сера встречается в огипсованных мергелях в виде гнезд и желваков вместе с гипсом. Общая мощность сероносного горизонта 47 м. Душакское серопроявление находится в 18 км к юго-западу от станции Душак в ущелье того же названия, в непосредственной близости от Душакских сероводородных источников. Здесь в ядре Келатской антиклинали обнажается сульфатно-карбонатная толща мальма-неокома мощностью до 1000 м, в которой отмечаются включения самородной серы. Мощность осерненного горизонта 10 м. Определенный интерес с точки зрения поисков самородной серы представляет Гаурдагская

антиклиналь, в пределах которой в отложениях сеномана и мальма-неокома развиты сероводородные воды с концентрацией сероводорода от 140 до 540 мг/л.

Западно-Копетдагский возможно сероносный район охватывает складки Западного Копетдага и Малый Балхан, которые сложены осадками мела-неогена, погружающимися под мощный чехол неоген-четвертичных отложений Западно-Туркменской низменности. Сероносность связана с акчагыльскими гипсовыми песчано-глинистыми отложениями. В Западном Копетдаге выявлены серопроявления Бурун-Су, Ак-Оба, Узун-Су и Аладаг. Серопроявление Бурун-Су находится в 55 км к юго-западу от станции Казанджик, в юго-западной периклинальной части Данатинской антиклинали. Осернение приурочено к песчано-глинистым битуминозным отложениям акчагыла. Вскрытая и опробованная мощность осерненных пород 0,45 - 3,5 м, содержание серы 4,4 - 14,08%.

Серопроявление Ак-Оба расположено в 90 км к юго-юго-востоку от станции Казанджик на северо-восточном склоне горы Ак-Оба. В геологическом строении принимают участие отложения акчагыльского яруса и континентальные подакчагыльские образования (тепинская свита). Сероносная залежь представляет собой линзу, вытянутую с юго-запада на северо-восток. Мощность залежи 0,5 - 0,7 м. Содержание серы не превышает 8,96%, в большинстве случаев колеблется от 1,34 до 5,56%.

В пределах Малого Балхана с давних пор известно месторождение Шорджа. Оно расположено в 12 км к юго-западу от станции Айдин у западного подножья горы Шорджа и состоит из трех участков (Григорович, 1934). Самый крупный южный участок площадью 80 тыс. м<sup>2</sup>. Осернение развито отдельными гнездами и линзами. Среди вмещающих пород преобладают светло-серые кварцевые песчаники акчагыльского возраста. Подчиненное значение имеет осернение в зеленых гипсовых глинах и конгломератах. Мощность осерненной зоны от 0,3 до 5 м, содержание серы 3 - 14%. На северном и западном участках осернение приурочено к брекчии трения в приповерхностных слоях. Мощность осерненной зоны здесь незначительная.

Благоприятная геотектоническая позиция Западного Копетдага и гидрогеохимические предпосылки могут выдвинуть характеризуемый район в число весьма перспективных для поисков месторождений самородной серы. Неблагоприятный фактор здесь - ограниченное развитие сульфатоносных отложений.

### Западно-Туркменский возможно сероносный бассейн

Этот бассейн охватывает восточный борт Южно-Каспийской впадины (Западно-Туркменская низменность), Кубадаг-Карабогазское поднятие, Большой Балхан и Туаркыр. На территории бассейна выделяются возможно сероносные области Западно-Туркменской низменности и Карабогазская.

На площади возможно сероносной области Западно-Туркменской низменности все известные серопроявления приурочены к пескам четвертич-

ного возраста нефтегазоносных антиклинальных структур (Котурдепе, Тургайдаг, Боядаг, Гограндаг, Чикишляр, Кукурча и др.). Осернение встречается в виде цемента, гнезд, корочек и отдельных вкраплений кристаллической серы. Наиболее крупное Котуртепинское серопроявление. Оно расположено в 47 км к запад-юго-западу от станции Джебел. Здесь на бугре Котурдепе и в его окрестностях на площади 25 км<sup>2</sup> распространены осерненные песчаные породы четвертичного возраста, где сера обычно служит цементом. Вместе с серой присутствуют гипс, квасцы и другие минеральные новообразования. Содержание серы в породах до 30%. Серопроявления Западно-Туркменской изменности приурочены или к тектоническим зонам (Боядаг, Тургайдаг, Котурдепе и другие), или к грязевым вулканам (Гограндаг, Чикишляр и другие) и связаны с окислением сероводорода, который выносится из недр нефтегазоносных структур.

Карабогазская возможно сероносная область располагается в северной части Западно-Туркменского бассейна. В ее пределах выделяется Красноводский возможно сероносный район, на площади которого выявлены два проявления самородной серы: Красноводское и Восточно-Красноводское.

Красноводское (Кукуртлинское) проявление серы находится в 55–60 км к северо-востоку от г. Красноводска. Осерненный пласт обнажается в обрывах Красноводского плато и прослеживается на 40 км. Месторождение известно давно, а в 1916 г. была даже предпринята попытка его разработки. Самородная сера в виде желваков приурочена к нижней части разреза акчагыльского яруса, сложенного известковистыми глинами и глинистыми мергелями, известняками, песчаниками. Сера тонкодисперсная, состоит из мельчайших кристаллов и содержит 87–97% элементарной серы, 1,26% золы и 0,15% влаги.

Восточно-Красноводское серопроявление расположено на южном побережье залива Кара-Богаз-Гол к югу от мысов Сенгир и Тараба. Сера в виде сферических включений содержится в ракушечниках акчагыльского яруса.

Говоря о сырьевых источниках элементарной серы, следует обратить внимание на сероводород, растворенный в подземных водах. На территории Туркмении сероводородные минеральные воды широко распространены и при комплексном использовании могут представлять определенный промышленный интерес. Например, подземные воды Гаурдака выносят из недр от 0,1 до 1 г элементарной серы в каждом литре воды.

Сероводородные воды Туркмении связаны с различными литолого-стратиграфическими комплексами и характеризуются разнообразной концентрацией сероводорода. Высоким содержанием сероводорода отличаются подземные воды верхнеюрских отложений Гаурдак-Кугитангского и сенон-палеоценовых отложений Бадхыз-Карабильского районов, залегающие на глубине до 1000 м. Здесь концентрация сероводорода в подземных водах достигает 200–1200 мг/л. На остальной территории в подземных водах содержание сероводорода либо незначительно, либо

воды с высокой концентрацией сероводорода (до 1600 мг/л) залегают на глубине до 2000–4000 м.

Таким образом, Туркмения располагает потенциальными источниками и перспективными площадями для увеличения ресурсов серы. Для выявления и оценки этих ресурсов требуется усилить теоретические разработки, в первую очередь необходимы:

- а) геолого-экономическая оценка площадей, перспективных на сероводородсодержащие газы;
- б) геолого-экономическая оценка мелких и средних месторождений серы в связи с внедрением метода ПВС;
- в) дальнейшее совершенствование методов прогноза, поисково-реви-зионной оценки, а также методики поисков и разведки серных месторождений.

В текущем пятилетии предстоит расширить сырьевую базу на Гаурдаке, дать поисковую оценку сероносности Центрально-Каракумской области, провести поисково-реви-зионные работы на Бадхызе, Карабиле, в Западном Копетдаге и других районах на основе общей карты прогноза сероносности Туркмении.

#### Литература

- Алексенко И.И. Сера Предкарпатья. М., "Недра", 1967.
- Горбачев М.Г. Перспективы сероносности Средней Азии. – Труды Геол. ин-та, вып. 20. Казань, 1968.
- Григорович М.Б. Изученность сероносности Туркменской ССР. – В кн.: Проблемы Туркмении. Труды I конференции по изучению производительных сил Туркменской ССР, т. IV. Л., Изд-во АН СССР, 1934.
- Данов А.В. Геологические исследования в районе Каракумского серного месторождения. – Труды ГРУ, вып. 35, 1931.
- Данов А.В. Об условиях образования месторождений серы в Средней Азии. – Труды ЦНИГРИ, вып. 88, 1936.
- Нацкий А.Д. Материалы к познанию Каракумского серного месторождения. – Изв. Геол. Ком., вып. 35, М., 1926.
- Отрешко А.И. Сероносные провинции СССР. – Труды Геол. ин-та, вып. 20. Казань, 1968.
- Соколов А.С. Геологические закономерности строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. – Труды ГИГХСа, вып. 5, 1959.
- Ферсман А.Е. Геохимические проблемы серных бугров в пустыне Каракумы. – В кн.: Серная проблема в Туркменистане. Л., Изд-во АН СССР, 1926.
- Юшкин Н.П. Принципы классификации, размещение и структурные особенности сероносных территорий. – Труды Геол. ин-та, вып. 20. Казань, 1968.

## ГЕОЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС ГАУРДАКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕРЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СЕРОНОСНОСТИ ГАУРДАК-КУГИТАНГСКОГО РАЙОНА

Гаурдак-Кугитангский сероносный район является частью Амударьинского сероносного бассейна Среднеазиатской сероносной провинции (Коган, 1962; Отрешко, 1968). Среди известных месторождений этой провинции Гаурдакское пока единственное, представляющее промышленный интерес.

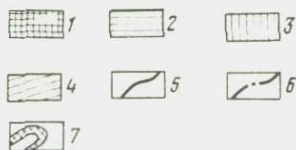
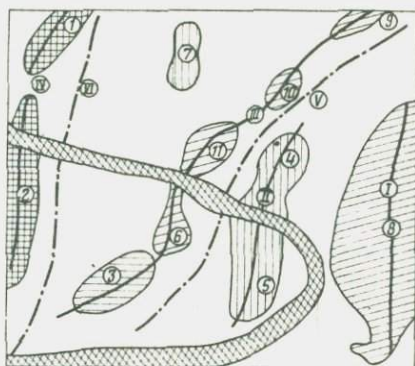
Геологический разрез района имеет двухъярусное строение: палеозойские метаморфические породы слагают складчатый фундамент, а осадочные породы мезозоя-кайнозоя — дислоцированный чехол. В последнем выделяются два типа тектонических нарушений: 1) крупные пликативные структуры, осложняющие южное крыло мегантиклинали Юго-Западного Гиссара (Седлецкий, 1964). С востока на запад это Кугитангская антиклиналь, Маликская синклиналь, Гаурдак-Тюбеготанское антиклинальное поднятие, Декханабад-Мукрынская синклиналь; 2) разрывные нарушения, накладывающиеся на складчатые структуры и осложняющие их: а) продольные разрывы, определяющие современную структуру осадочного чехла; б) поперечные разрывы, которые выражены значительно слабее (Седлецкий, 1964; Айзберг, 1961). Исключением является Узункудукский субширотный разлом, пересекающий юго-западную периклинали Гаурдакского поднятия. В месте их пересечения установлено Гаурдакское месторождение серы.

Общезвестна приуроченность серного оруденения к определенным фашиально-литологическим комплексам отложений, выделяемых в продуктивный разрез (Соколов, 1958, 1965; Отрешко, 1968). На Гаурдакском месторождении комплекс представлен гипс-ангидритами и маломощными сближенными пластами известняков и ангидрито-известняков (горизонт "R") гаурдакской свиты кимериджа. Последняя залегает на известняках гиссарской свиты оксфорда (фиг. 1). Основные серные залежи рудного горизонта "F" приурочены к нижней части продуктивного разреза, к границе указанных свит, а серные залежи рудного горизонта "D" на II участке — к горизонту "R". Серное оруденение генетически связано с разрывными нарушениями относительно малых амплитуд.

Гаурдакское поднятие, к юго-западной периклинали которого приурочены промышленные залежи серных руд, сложено гипс-ангидритами гаурдакской свиты; в сводовой его части на площади 12 км<sup>2</sup> обнажаются известняки гиссарской свиты. С трех сторон Гаурдакское поднятие ограничено разрывными нарушениями: юго-восточное крыло осложнено Шурчинским взбросом амплитудой 150-200 м, северо-восточное — Карикансайским сбросом амплитудой 100-150 м. Эти нарушения ограничивают Гаурдакскую горст-антиклиналь и примыкают у ее юго-западной периклинали к Узункудукскому разлому, имеющему вблизи месторождения азимут простирания 300-320°. Далее на северо-запад это нарушение, сменяя

Фиг. 1. Тектоническая схема Гаурдак-Кугитангского рудного района

1-4 - складки, ядра которых выполнены отложениями: 1 - палеогеновыми (1 - Лянгарская, 2 - Акайрынская), 2 - верхнемеловыми (3 - Аккумулямская, 3 - нижнемеловыми (4 - Янгиарыкская, 5 - Карабильская, 6 - Тагаринская, 7 - Кокмиарская), 4 - верхнеюрскими (8 - Кугитангская, 9 - Тюбеготанская, 10 - Лялимканская, 11 - Гаурдакская); 5 - оси антиклинальных зон: I - Кугитангской, II - Янгиарык-Карабильской, III - Тюбеготан-Гаурдакской, IV - Лянгарско-Акайрынской; 6 - оси синклинальных зон: V - Маликской, VI - Декханабад-Мукрынской; 7 - Узункудук-Кундалянгская зона разломов



азимут простирания на  $280-290^{\circ}$ , прослеживается как сбросо-сдвиг с амплитудой горизонтального смещения до 3 км (Айзберг, 1961).

Таким образом, названные дизъюнктивные нарушения образуют и ограничивают сложно построенный структурный блок - зону дробления, совпадающую с юго-западной периклиналью и частично сводовой частью Гаурдакского поднятия. В пределах этого структурного блока сформировалось серное месторождение (фиг. 2).

К наиболее крупным разрывным нарушениям субширотного простирания относятся Карачинский и Акбулакский сбросы, разбивающие Гаурдакское поднятие на три блоковые части. Карачинский сброс ограничивает наиболее приподнятую часть поднятия от его средней части. Он представлен четырьмя-пятью разрывами в верховьях оврагов Карача и Хайбалчи, а в присводовой части двумя ветвями разрывов, которые прослеживаются до колодца Шурча. Амплитуды смещений от 10 до 60 м. С разрывами Карачинского сброса связаны жильные образования барита, целестина, флюорита, кварца, клейофана.

Акбулакский сброс пересекает Гаурдакское поднятие в 2,5-3 км северо-восточнее Карачинского и представлен серией разрывов с опущенными юго-западными крыльями и с амплитудой смещения 20-30 м. Сброс имеет довольно широкую зону дробления, в пределах которой отмечают крупнопластинчатые гипсы, раздробленные и перемятые гипс-ангидриты, а также серопроявления в виде гнезд, зерен и налетов серы в гипс-ангидритах. Акбулакский сброс ограничивает среднюю часть Гаурдакского поднятия от его северной наиболее опущенной части.

Четкая литологическая дифференцированность продуктивного разреза позволяет выделить на месторождении два основных структурных этажа: 1) известняковую толщу гиссарской свиты; 2) известняково-ангидрито-

вую толщу гаурдакской свиты. В кровле гиссарской свиты установлены две основные системы сбросовых (блоковых) нарушений с простирающимися  $300-320^{\circ}$  и  $260-280^{\circ}$ , что сопоставляется с простираем Узункудукского разлома. Амплитуды этих нарушений от 1-15 до 50-80 м (чаще 5-20 м). Реже фиксируются нарушения с другими простирающимися. Указанные разрывные нарушения придают первому структурному этажу блоковое горст-грабенное строение. Образованные этими нарушениями в выше лежащих ангидритах локальные зоны дроблений оказались выполненными серно-кальцитовой рудой горизонта "F". Таким образом, разрывные блоковые нарушения в кровле гиссарской свиты, представляющие собой нарушения II-III порядка по отношению к Узункудукскому разлому, являются рудо-(серо)контролирующими тектоническими структурами.

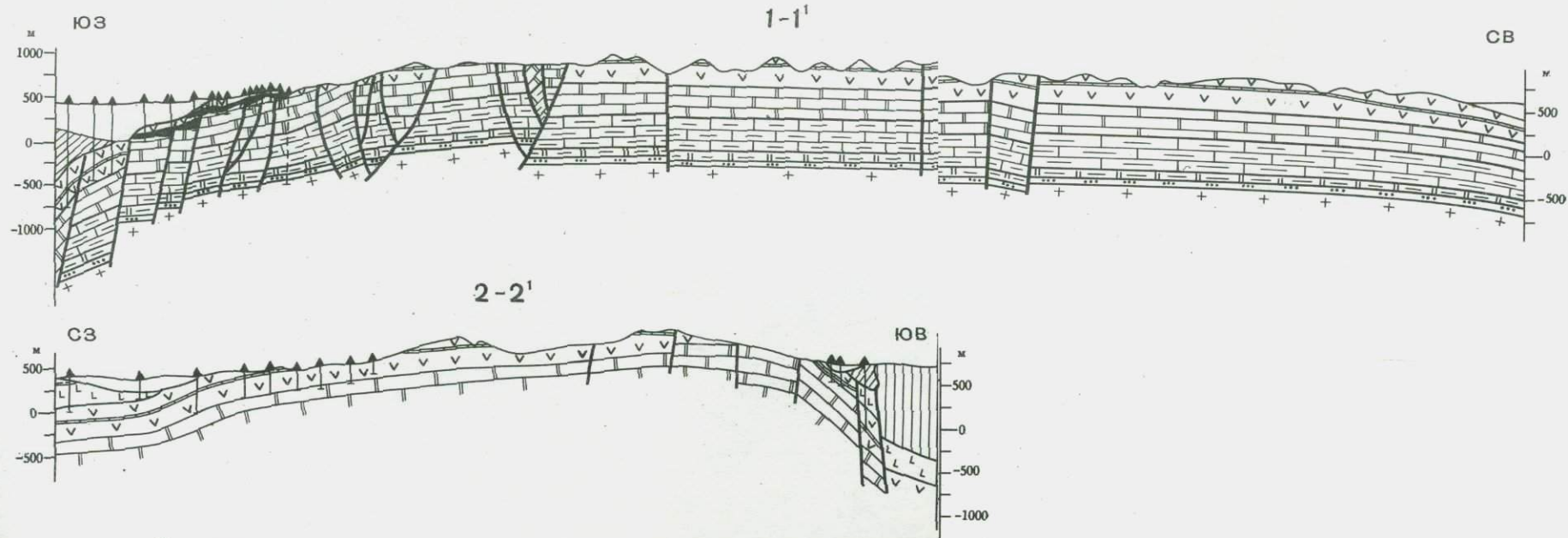
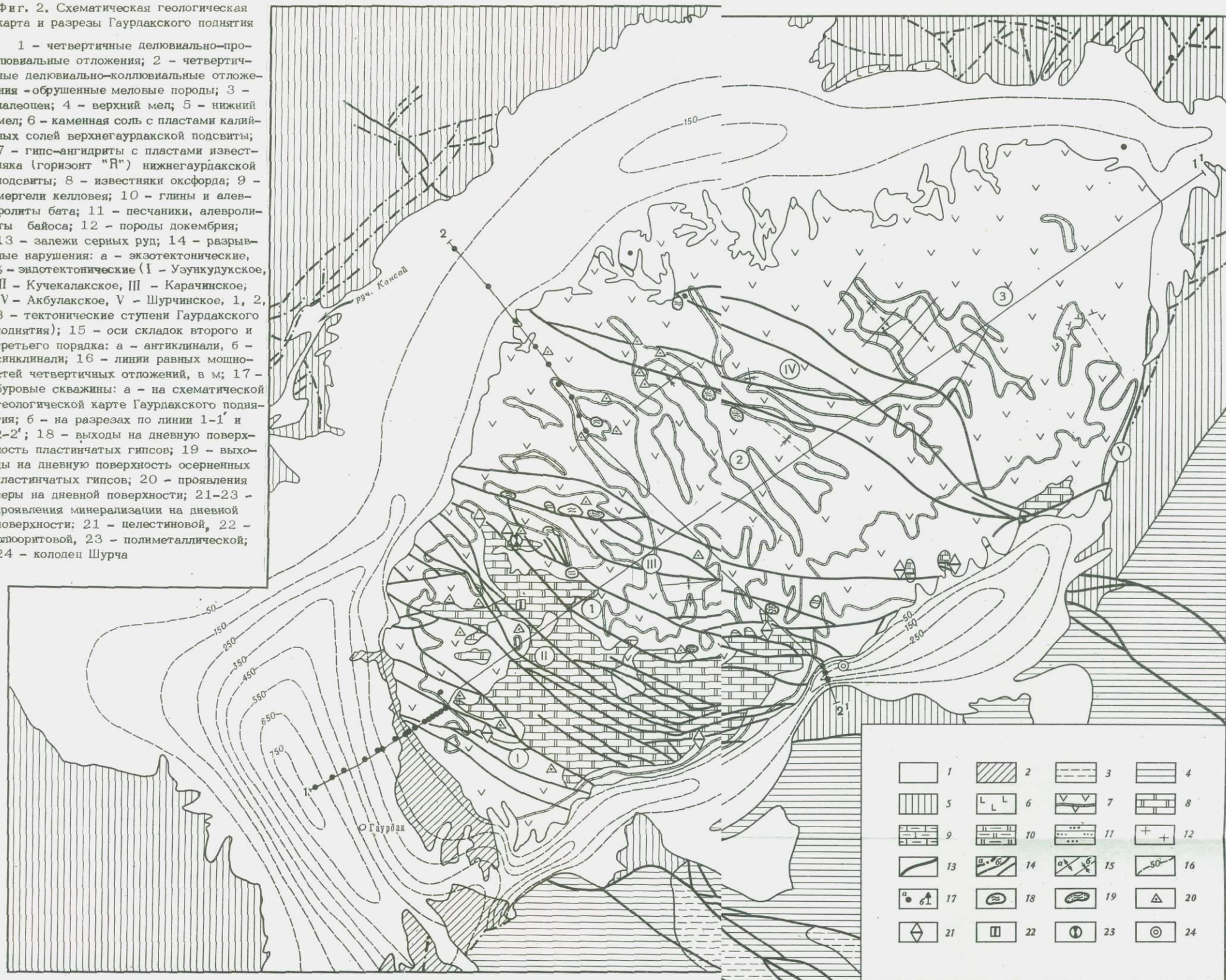
Между тектоническими формами первого и второго структурных этажей имеются несоответствия. Известняки горизонта "R", прослеживающиеся в ангидритовой толще гаурдакской свиты, образуют небольшие складки с шарнирами, параллельными Узункудукскому разлому. Подобные складчатые образования отсутствуют в кровле известняков гиссарской свиты и в ангидритовых толщах гаурдакской свиты ниже и выше известняков "R". В этих известняках разрывные блоковые нарушения отражаются различным образом: а) не затрагивают сплошности пластов, б) образуют зоны дробления и брекчирования шириной 5-20 м; в) в отдельных случаях смещают пласты известняков на несколько или десятки метров. Это свидетельствует, что разрывные нарушения, прослеживающиеся в кровле гиссарской свиты, затухают в пластичной толще гипс-ангидритов.

Анализ разрывной и трещинной тектоники определяет две основные стадии формирования структуры месторождения. В первую стадию образуются региональные дизъюнктивные и пликативные структуры и первая система блоковых нарушений. К концу стадии наступает ослабление дислокационных процессов при сохранении общей тенденции к подъему всего региона. В этот период интенсифицируется эрозионная деятельность речной сети, проявляющаяся вдоль зон, ослабленных разрывами. Вторая стадия совпадает с активизацией тектонической деятельности собственно Узункудукского разлома. В эту стадию преобладают сдвиговые дислокации и образуется вторая система блоковых нарушений. В позднетектоническое время эта стадия проявляется в пострудных подвижках.

На месторождении выделяются два генетических типа серных руд: а) преимущественно метасоматические (рудный горизонт "F"), образующиеся в зонах дроблений блоковых тектонических нарушений путем замещения сульфатных пород продуктивной толщи серой и вторичным кальцитом. Руды этого типа и представляют собой Гаурдакское месторождение (90% запасов серы); б) преимущественно наложенного (тип выполнения) осернения, образующегося в результате гидрогенных процессов. Сера отлагается в трещинах, порах в известняках и ангидрит-известняковых породах горизонта "R" и образуется верхний рудный горизонт "D". Серная минерализация появляется также в глинистых породах обрушенных меловых и четвертичных отложений, по трещинам в ангидритах и в подстилающих известняках гиссарской свиты.

Фиг. 2. Схематическая геологическая карта и разрезы Гаурдакского поднятия

1 - четвертичные делювиально-пролювиальные отложения; 2 - четвертичные делювиально-коллювиальные отложения - обрушенные меловые породы; 3 - палеоцен; 4 - верхний мел; 5 - нижний мел; 6 - каменная соль с пластами калийных солей верхнегаурдакской подсытки; 7 - гипс-ангидриты с пластами известняка (горизонт "R") нижегаурдакской подсытки; 8 - известняки оксфорда; 9 - мергели келловеев; 10 - глины и алевролиты бата; 11 - песчаники, алевролиты байоса; 12 - породы докембрия; 13 - залежи серных руд; 14 - разрывные нарушения: а - экзотектонические, б - эндотектонические (I - Узункудукское, II - Кучекалакское, III - Карачинское, IV - Акбулакское, V - Шурчинское, 1, 2, 3 - тектонические ступени Гаурдакского поднятия); 15 - оси складок второго и третьего порядка: а - антиклинали, б - синклинали; 16 - линии равных мощностей четвертичных отложений, в м; 17 - буровые скважины: а - на схематической геологической карте Гаурдакского поднятия; б - на разрезах по линии 1-1' и 2-2'; 18 - выходы на дневную поверхность пластинчатых гипсов; 19 - выходы на дневную поверхность осерненных пластинчатых гипсов; 20 - проявления серы на дневной поверхности; 21-23 - проявления минерализации на дневной поверхности: 21 - целестиновой, 22 - флюоритовой, 23 - полиметаллической; 24 - колодец Шурча



Два основных генетических типа серных руд пространственно разоб-  
щены. Морфология и условия залегания рудных тел зависят от особен-  
ностей проявления блоковой разрывной тектоники и характеризуются  
трубообразной, вытянутой линзовидной формой с резкими раздувами и  
перезимами, с рукаво- и пластообразными ответвлениями, в чем про-  
являются морфологические особенности жильных образований.

Залежи серных руд Гаурдака находятся в разных гидрогеохимических  
условиях. Верхние части их расположены в гидродинамической зоне  
аэрации, определяющей резко окислительную среду, нижние - в зоне  
насыщения, представленной высокоминерализованными подземными неф-  
тяными водами со значительным содержанием сероводорода.

Выявленная биогидрохимическая зональность подземных вод место-  
рождения (Гуревич, 1967) характеризуется как гидрохимическая анома-  
лия, а ее средняя зона является зоной современного серообразования  
(Иванов, 1964; Юшкин, 1968).

Основные условия формирования серных залежей месторождения сле-  
дующие. Гипс-ангидриты продуктивной толщи являются "сырьем" для  
образования метасоматических серно-кальцитовых руд. Площадь распро-  
странения гипс-ангидритов гаурдакской свиты в пределах Юго-Западно-  
го Гиссара составляет более 10 тыс. м<sup>2</sup>. Это крупный сульфатоносный  
бассейн верхнеюрского возраста, в пределах которого серное месторож-  
дение сформировалось в определенных структурно-тектонических услови-  
ях, где породы продуктивного разреза оказались дислоцированными раз-  
рывами с образованием ослабленных водопроницаемых зон. К этим зон-  
нам приурочены залежи серных руд.

Таким образом, блоковые разрывные нарушения являются тектониче-  
скими структурами, контролирующими серное оруденение. Геоморфологи-  
ческие и палеогеоморфологические условия характеризуются достаточно  
интенсивной денудацией пород продуктивной толщи в присводовой части  
Гаурдакского поднятия, т.е. на участках сопряжения блоковых нарушений  
с разрывами Шурчинского взброса. Здесь блоковые зоны дробления ока-  
зались приоткрытыми глубокой эрозией гипс-ангидритов и гиссарских  
известняков.

Эрозионная деятельность речной сети выразилась в заложении глу-  
бокого вреза древней речной долины (праталина Канса) вдоль разрыв-  
ных нарушений с последующей аккумуляцией в ложе праталины преиму-  
щественно глинистых отложений (Беленицкая, 1968; Гуревич, 1967;  
Петров, 1955). Это определило наиболее низкое (абсолютные отметки  
от -200 до -250 м) и максимально высокое (абсолютные отметки от  
+580 до +600 м) положение уровней древних местных базисов эрозии  
и палеогидродинамический режим на месторождении. Установлено, что  
границы распространения серных залежей по вертикали примерно совпа-  
дают с указанными гипсометрическими высотами. Образование эрозий-  
ного "окна" в присводовой части поднятия способствовало инфильтрации  
атмосферных кислородсодержащих вод, развитию карста в продуктивной  
толще (дорудный карст) и формированию гидродинамической подзоны  
смешанных вод (Соколов, 1958, 1962).

Наличие скоплений углеводородов - один из основных факторов обра-  
зования экзогенных месторождений серы (Уклонский, 1940; Соколов,

1958). На Гаурдакском месторождении газ и нефть получены из скважин, пройденных на серу в зоне Узункудукского разлома (I участок) и Шуаркярызского сброса (IV участок). Органические вещества встречаются в известняках гиссарской свиты и подземных водах. Таким образом, наличие углеводородов и их поступление в подзону смешанных вод характеризуют среду, благоприятную для развития процессов серообразования (Беленишкая, 1968; Гуревич, 1967; Иванов, 1964; Соколов, 1958, 1965; Уклонский, 1940; Юшкин, 1968).

На признаки метасоматического характера замещения гипс-ангидритов серно-кальцитовой рудой указывают многие авторы (Коган, 1958, 1962; Беленишкая, 1968; Лазарев, Мамчур, 1969; Лазарев и др., 1971). Метасоматические серные руды горизонта "F" образуются в две реакционные стадии: первая стадия - продуцирование  $H_2S$  и  $CO_2$  при биохимической редукции ионов  $SO_4^{2-}$ ; вторая стадия - окисление  $H_2S$  до  $S_{эл.}$  молекулярным кислородом и осаждение последней в парагенезисе с кальцитом. Первая стадия наиболее активно протекает в условиях максимального приближения колоний сульфатредуцирующих бактерий к источнику "питания" сульфатом. Имея весьма малые размеры, сульфатредуцирующие бактерии могут развиваться в объемах, наполненных растворами пустот в гипс-ангидритах, соответствующих капиллярным и субкапиллярным трещинам и порам. Следовательно, реакционные стадии серного рудообразования протекают в объемах поровых растворов, что является одним из основных факторов, характеризующих процесс минерализации как метасоматический (Коржинский, 1962; Казыцын, Рудник, 1968). Продукт жизнедеятельности бактерий - сероводород, будучи токсичным для них, должен "утилизироваться". Этот процесс происходит путем его окисления кислородом, поступающим в поровые растворы с инфильтрационными водами. Тионовые бактерии интенсифицируют процессы окисления сероводорода (Иванов, 1964; Померанц, 1968).

Реакционные стадии серо(рудо)образования протекают также в макрополостях пород продуктивной толщи. Сероводород из зоны редукции мигрирует в зону окисления. Образующаяся сера совместно с кальцитом или без него отлагается в различных коллекторских породах. Подобным гидрогенным путем образуются серные руды горизонта "D" и часть серы в рудах горизонта "F". Продуцируемые в процессе гидрогенеза  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $Ca^{+2}$  и  $S_{эл.}$  (коллоидные частицы) могут мигрировать в поровые растворы и создавать избыток (перенасыщение растворов) компонентов, участвующих в метасоматических реакциях серо(рудо)образования. По мере восстановления уровня подземных вод зона серо(рудо)образующих растворов мигрирует вверх, что обуславливает наращивание серных залежей вдоль блоковых нарушений.

Анализ результатов, проведенных в последние 15-20 лет поисковых работ с учетом существующих поисково-оценочных критериев (Соколов, 1958; Отрешко, 1968), позволяет оценить перспективы сероносности Гаурдак-Кугитангского района и определить их дальнейшее направление.

На площади Гаурдакской структуры балансовые запасы серных руд сосредоточены в пределах I-IV участков. В результате разведки в 1965-1970 гг. на этих участках контуры промышленной сероносности значительно расширены. Поисковыми работами выделены новые сероносные

участки: Узункудукский, расположенный южнее I и V участков и прилегающий с северо-востока к IV участку. Большая часть запасов II, IV и V участков пригодна для открытой отработки, на Узункудукском, а частично на II, IV и V участках, где серные залежи обводнены и залегают на глубинах 400–700 м – для разработки методом ПВС.

Весьма перспективно также юго-восточное крыло Гаурдакской брахиантиклинали (участок Балахана) к северо-востоку от Узункудукского участка. Здесь проходит врез узкой эрозионной долины, образованный в результате размыва верхнеюрской соляной толщи и выполненный обрушенными породами нижнего мела мощностью 200–300 м. Выявлена серия дизъюнктивных нарушений, сочленяющихся с Узункудукской зоной разломов и пересекающихся с разрывами северо-восточного простиранья (Шурчинский взброс). В результате на участке образовались мощные зоны дробления и горст-грабеновые структуры, благоприятные для проникновения в продуктивную карбонатно-сульфатную толщу растворов, содержащих углеводороды и сероводород. Серные залежи здесь ожидаются на глубинах свыше 500 м и будут пригодны для разработки методом ПВС.

Предполагается наличие залежей серных руд на отдельных участках вдоль всего юго-восточного крыла Гаурдакского поднятия, в частности на участке Шурча, а также в северо-восточной периклинали поднятия. Участок Шурча опосредован только в западной части. Здесь хотя и не встречено промышленное осернение, бурением обнаружен ряд косвенных признаков, свидетельствующих о возможном наличии сероносных залежей. Северо-восточная периклинали Гаурдакского поднятия характеризуется наличием разрывных нарушений северо-западного простиранья, вдоль которых отмечаются многочисленные точки серопроявлений и выходы эпигенетических крупнопластинчатых гипсов. Одиночные поисковые скважины встретили спорадическое осернение в породах продуктивной толщи.

Перспективные площади для выявления серных руд, пригодных для разработки открытым способом, намечаются в районе оврагов Карача, Кугуртли, Халбайчи и Акбулак, расположенных восточнее и северо-восточнее V участка. В пределах оврагов Карача и Кугуртли наиболее перспективна площадь юго-восточного продолжения V участка вплоть до Шурчинского участка. Эта площадь расположена в северной части поднятия и частично на северо-западном и юго-восточном крыльях вблизи выходов гиссарских известняков в зоне Карачинского разлома. С этой зоной связаны примазки углеводородов, многочисленные проявления серы и жильных минералов: кальцита, целестина, барита, флюорита, клейофана. Вдоль тектонических нарушений широко развиты карстовые образования и связанные с ними субтерральные отложения (Лазарев, Вдовиченко, 1970). Одиночные поисковые скважины вскрыли серную руду мощностью от 1,5 до 6,0 м с промышленным содержанием серы на глубинах до 250–300 м.

Перспективы сероносности оврагов Халбайчи и Акбулак определяются выявленными тектоническими и минералого-геохимическими предпосылками, выдвигающими эти участки в качестве первоочередных объектов для поисков и разведки необходимых запасов. В овраге Халбайчи между скв. 518 и 519 выявлена крупная зона пликвативных дислокаций

в известняках горизонта "R", а также выходы слабо осерненной известняково-гипсовой породы и эпигенетических крупнопластинчатых гипсов. Сероносность района оврага Акбулак подтверждается скв. 503, заложеной между двумя разрывами Акбулакского сброса. На глубине 260 м скважина вскрыла богатую серную руду мощностью 0,4 м. Вдоль сброса нередко отмечаются выходы крупнопластинчатого гипса, местами (овраг Гаравакамыш, район Кугурдак и другие) интенсивно осерненого. В известняках горизонта "R" встречаются крупнокристаллический кальцит и пластинчатые гипсы с высоким содержанием серы. Сульфатная продуктивная толща участками подвергалась значительному эпигенетическому преобразованию.

В зоне погружения юго-западных склонов хребта Кугитангтау выявлены водоносный горизонт с высокой концентрацией сероводорода (1340 мг/л), многочисленные дизъюнктивные нарушения субмеридионального простирания, которые прослежены на выходах известняков гиссарской свиты и установлены на площадях, закрытых четвертичными отложениями, комбинированным методом геолого-геофизических и геохимических (потенциметрических) исследований. Осернение могло, по-видимому, распространяться вверх по разрезу продуктивной толщи на расстоянии более 200 м от кровли гиссарских известняков. На этой площади выявлен ряд серопроявлений как в обнажениях, так и по скважинам.

Местами серообразующие процессы проявились весьма интенсивно. Так, по скв. 108, 1п, 2п, 11п и 41к вскрыто осернение, аналогичное кондиционным рудам Гаурдакского месторождения (содержание серы составляет 15-25%). В обнажениях вместе с серой часто встречаются парагенные ей минералы. Вдоль юго-западного склона хребта Кугитангтау проходит эрозионная долина, выполненная преимущественно четвертичными отложениями мощностью 350-400 м, представленными глинисто-галечниковыми образованиями. В ложе долины гипс-ангидриты и известняки продуктивного разреза, осложненные разрывными нарушениями субмеридионального простирания, размыты. Образование и развитие этой глубокой долины (прадолина р. Кугитанг) и интенсивная денудация пород крыла, вплоть до обнажения больших массивов известняков гиссарской свиты, способствовали накоплению инфильтрационных вод и энергичному водообмену в породах продуктивной толщи. Это могло привести к формированию гидродинамической подзоны смешанных вод и связанной с ней зоны серообразующих растворов на значительной глубине. Указанные геоморфологические и гидрогеологические особенности и наличие многочисленных зон разрывных нарушений позволяют высказать мнение о возможном образовании залежей серных руд под северо-западным и юго-западным бортами прадолины и в направлении площадей Кугитангского и Карлюкского месторождений калийных солей.

В Юго-Восточной Туркмении имеются перспективы выявления серных месторождений на приразломных структурах Донгузсырт и Шальгеричбаба, расположенных в 110-130 км к юго-западу от Гаурдака на левобережье р. Амударья. Возможность выявления промышленной сероносности на этих структурах определяется наличием тектонических разломов, секущих продуктивную карбонатно-сульфатную толщу, и гидрогеологической их раскрытостью.

## Литература

- Айзберг Р.Е. Основные черты строения Приамударьинского района Юго-Восточной Туркмении. – Геол. нефти и газа, 1961, №2.
- Беленицкая Г.А. Современные гидрогеохимические процессы на Гаурдакском серном месторождении. – Докл. АН СССР, 1968, т. 183, №6.
- Гуревич М.С. Биогидрохимическая аномалия Гаурдакского серного месторождения. – Докл. Географ. об-ва СССР, вып. 2, 1967.
- Иванов М.В. Роль микробиологических процессов в генезисе месторождений самородной серы. М., "Наука", 1964.
- Казицын Ю.В., Рудник В.А. Руководство к расчету баланса веществ и внутренней энергии при формировании метасоматических пород. М., "Недра", 1968.
- Коган В.Д. К генезису самородной серы. – Докл. АН СССР, 1958, т. 125, №5.
- Коган В.Д. К вопросу о взаимоотношении гипса и самородной серы. – Минералог. сборник Львовск. геол. об-ва, №15, 1962.
- Коржинский Д.С. Теория процессов минералообразования. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Лазарев И.С., Мамчур Г.П.  $C^{12}/C^{13}$  в карбонатах Гаурдакского месторождения серы. – Изв. АН ТуркмССР, серия физико-техн., хим. и геол. наук, 1969, №3.
- Лазарев И.С., Вдовиченко Г.М. Карст и субтерральные отложения на Гаурдакском месторождении серы. – Изв. высших учебн. завед., геол. и разв., 1970, №9.
- Лазарев И.С., Худайкулиев Х., Мясогутов А.И., Вдовиченко Г.М. Гаурдак-Кугитангский сероносный район. Ашхабад, Изв. Упр. геол. СМ ТуркмССР, 1971.
- Отрешко А.И. Сероносные провинции СССР. – Труды Геол. ин-та, вып. 20. Казань, 1968.
- Петров Н.П. Условия образования одного из серных месторождений в юго-западных отрогах Гиссара. – Зап. Узбекского отд. Всесоюзн. минерал. об-ва, вып. 8, 1955.
- Померанц Л.Б. Микробиологические процессы в подземных водах Гаурдакского серного месторождения. – Докл. АН СССР, 1968, т. 179, №4.
- Седлецкий В.И. Новые данные по тектонике Гаурдак-Кугитангского района. – Труды Геол. ком. ТуркмССР, вып. 2, 1964.
- Соколов А.С. Основные закономерности геологического строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. – Сов. геол., 1958, №5.
- Соколов А.С. О генезисе месторождений самородной серы. – Литология и полезные ископаемые, 1965, №2.
- Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М., Госгеолтехиздат, 1962.
- Уклонский А.С. Парагенезис серы и нефти. Ташкент. Изд. Узбекского филиала АН СССР, 1940.
- Юшкин Н.П. Минералогия и парагенезис самородной серы в экзогенных месторождениях. Л., "Наука", 1968.

## ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ПРОЯВЛЕНИЙ САМОРОДНОЙ СЕРЫ В БАШКИРСКОМ ПРИУРАЛЬЕ

Поисково-ревизионными работами Башкирского территориального геологического управления обнаружены скопления самородной серы в пределах восточной окраины Русской платформы и Бельской зоны Предуральского краевого прогиба, приуроченные к песчаникам, мергелям, доломитизированным известнякам, ангидритам, гипсам и галиту в отложениях девонской, каменноугольной и пермской систем. Самородная сера среди пермских карбонатных и сульфатно-карбонатных отложений выявлена на платформе и в прогибе. Сера в карбонатных отложениях девона и карбона тяготеет только к центральным антиклинальным поднятиям прогиба, которые характеризуются наибольшей гидрогеологической раскрытостью нефтегазоносных структур. Осернение в девонских и каменноугольных отложениях промышленного интереса не представляет.

Наиболее интересны для выявления промышленных месторождений самородной серы пермские отложения в зоне сочленения восточной окраины Русской платформы с западным бортом Предуральского краевого прогиба (см. рисунок). Большинство находок самородной серы в платформенной части зоны тяготеет к удутелякской свите, представленной карбонатно-сульфатными отложениями, залегающими в основании кунгурского яруса между известняково-доломитовыми образованиями артинского яруса и сульфатными отложениями иренского горизонта. Нефтегазовые залежи в данном интересном разрезе отсутствуют, хотя углеводородные проявления развиты широко. Весьма характерно, что в палеотектоническом отношении осерненные карбонатно-сульфатные отложения удутелякской свиты развиты преимущественно вдоль восточной окраины кунгурской платформы — за пределами западного борта кунгурского предгорного прогиба и концентрируются на конседиментационных поднятиях. Подобное их размещение определяется следующими особенностями развития раннекунгурского бассейна.

Во время накопления удутелякской свиты бассейн седиментации в предгорном прогибе был глубоководным. Об этом свидетельствуют залегающие в основании трансгрессивных пачек удутелякской свиты черные битуминозные мергели листоватой текстуры, представляющие собой фациальные аналоги депрессионных отложений артинского яруса. Бассейны седиментации раннекунгурского времени были унаследованы от некомпенсированного глубоководного прогиба сакмаро-артинского времени. Мелководным кунгурский бассейн в пределах фациальных зон прогиба стал к началу иренского времени, когда высокая скорость хомогенного и терригенного осадконакопления компенсировала скорость прогибания предгорного прогиба. В пределах структурно-фациальных зон кунгурской платформы бассейн на протяжении всего кунгурского времени был мелководным, о чем свидетельствуют широко развитые локальные конседиментационные поднятия и оолитовые текстуры доломитизированных известняков трансгрессивных пачек удутелякской свиты.

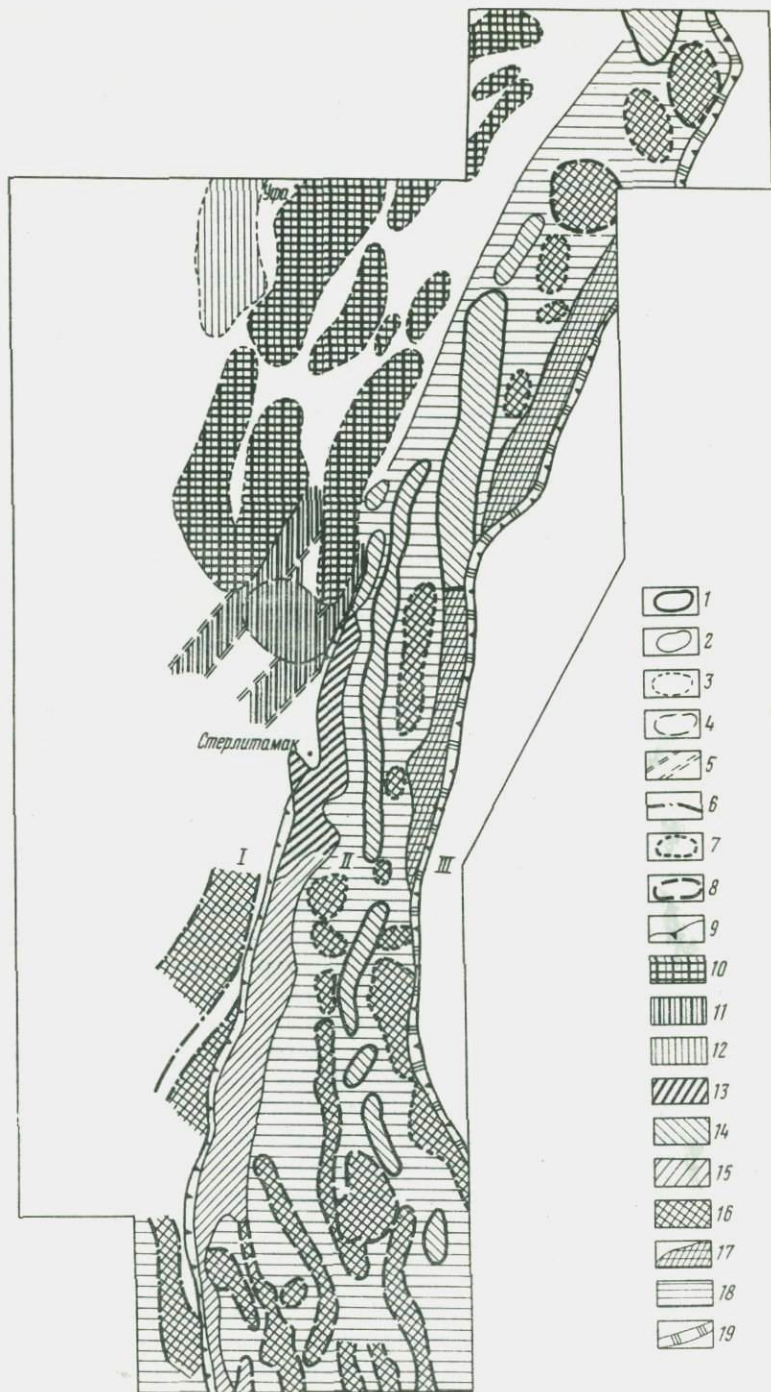
Разница в глубинах бассейнов седиментации позволяет предположить, что и граница раздела окислительной и восстановительной сред также была различной: в условиях мелководного бассейна она могла совпадать с поверхностью карбонатных илов морского дна, которые постоянно аэрировались. В условиях глубоководных впадин предгорного прогиба эта граница находилась выше осадка, и донные отложения в этом случае, очевидно, не аэрировались. Следовательно, степень окисленности синхронных отложений платформы должна быть выше, чем в прогибе.

Характернейшая особенность раннекунгурского времени – линейные конседиментационные системы повышенной флюидной проницаемости осадочного чехла, по которым осуществлялась вертикальная "струйная" миграция углеводородных флюидов, сернистых соединений и других продуктов из нижних металлогенических зон в бассейны кунгурского времени. В пределах линейных зон конседиментационной проницаемости формировались восстановительные геохимические барьеры за счет наибольшей концентрации на их участках сероводорода, поступившего из нижних частей разреза осадочного чехла, а также генерированного процессами биогенной сульфатредукции.

В седиментационные зоны предгорного прогиба в составе "пресного" стока с уральских палеоводосборов поступали растворы и взвеси рудных элементов, качественный состав которых определялся составом водосборов, подвергавшихся химической и механической денудации в трансгрессивные циклы раннекунгурского времени. Как показывают закономерности размещения повышенных концентраций марганца и титана, а также площадное распределение таких минералов серого шлиха терригенных пород улутеляжской свиты, как турмалин, циркон, ильменит, гранаты и т.п., пределом влияния "пресного стока" на противоположные структурно-фациальные зоны платформы являлась зона сочленения западного борта предгорного прогиба и платформы. Характерно, что концентрации повышенных и рудных накоплений такого элемента, как марганец, поступившего в бассейн седиментации преимущественно в составе растворов, не выходят за пределы западного борта предгорного прогиба.

На участках интенсивного сероводородного заражения, которыми были зоны локальных восстановительных геохимических барьеров, формировался сульфид марганца – алабандин. Именно такая картина наблюдается в пределах Улутеляжского марганцеворудного поля. Здесь к зонам сочленения структурно-фациальных блоков улутеляжской свиты в доломитизированных известняках и мергелях трансгрессивных чашек приурочена наиболее интенсивная алабандиновая минерализация, сопровождаемая в ряде случаев выделениями битумов. В непосредственной близости от рудного поля к отложениям среднего девона приурочено месторождение нефти, а выбросы углеводородных газов наблюдались при разбуривании Улутеляжского месторождения марганца.

Таким образом, минеральные находки самородной серы, а также повышенные и рудные концентрации карбонатов и сульфидов марганца, приурочиваясь к разновозрастным и однотипным отложениям улутеляжской свиты, контролируются палеотектоническими, палеогеохимическими и палеоструктурными особенностями раннекунгурских бассейнов седимен-



таши. Следовательно, подобные типы накопления самородной серы и марганца можно классифицировать как сингенетические и относить к герцинскому этапу тектогенеза.

Однако в пределах изученного района возможно выявление и эпигенетических скоплений самородной серы, связанных с альпийским этапом тектогенеза. На возможность эпигенетического накопления самородной серы указывал А.И. Отрешко, который связывал формирование серы со вскрытием неогеновой гидрографической сетью карбонатно-сульфатных комплексов кунгурского яруса.

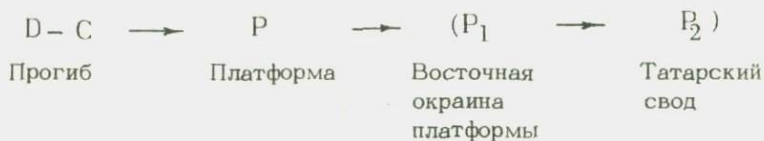
О возможности формирования эпигенетических накоплений самородной серы: в палеозойских (в том числе и пермских) отложениях свидетельствуют такие данные. При движении от Предуральского прогиба в сто-

---

#### Карта прогноза сероносности Башкирского Приуралья

1-5 - зоны осернения: 1 - установленных антиклинальных складок Бельской зоны Предуральского краевого прогиба, 2 - рифовых массивов западного борта Бельской зоны Предуральского краевого прогиба, 3 - положительных (биогермных?) структур восточной окраины моноклиналичного склона Русской платформы, 4 - куполовидных морфоструктур восточной окраины моноклиналичного склона платформы, 5 - линейных ("шовных") морфоструктур; 6-8 - возможные зоны осернения: 6 - положительных структур моноклиналичного склона, 7 - куполовидных и валобразных морфоструктур Бельской зоны Предуральского краевого прогиба, 8 - кепроков (?) линейных солянокупольных структур Бельской зоны Предуральского краевого прогиба (мощность кепроков не установлена); 9 - границы геотектонических регионов (I - восточная окраина моноклиналичного склона Русской платформы, II - Бельская зона Предуральского краевого прогиба, III - западный склон Южного Урала); 10-13 - площади, перспективные для поисков месторождений самородной серы: 10 - площади первой очереди работ в пределах Загорского, Тавтимановского и Рязано-Охлебининского валов (возможна постановка поисково-ревизионного бурения), 11 - площади работ первой очереди, сопряженные с зонами морфотектонической трещиноватости (возможна постановка поискового бурения), 12 - площади второй очереди поисково-ревизионных работ, 13 - площади третьей очереди поисково-ревизионных работ; 14-16 - площади, малоперспективные для поисков месторождений самородной серы: 14 - с трещинно-кавернозным морфологическим типом осернения, 15 - с высоким коэффициентом углеводородного заполнения структур, 16 - с невыясненной перспективностью сероносности нижнепермских комплексов; 17-19 - площади, не перспективные для поисков месторождений серы: 17 - с высокой степенью неотектонической активности, 18 - с глубиной залегания возможных сероносных зон свыше 1000 м, 19 - восточный контур развития сульфатных фаций нижнепермской галогенной формации

рону Татарского свода намечается следующий ряд возрастного скопления серовмещающих комплексов:



В этом же направлении отмечается и подъем верхней границы сероводородного заражения верхнепалеозойских водоносных комплексов, а также размещение различных нефтепроизводных продуктов (битумов и пр.).

Серовмещающие нижнепермские структуры рифовых массивов западного борта прогиба так же, как и отмеченные выше осерненные зоны девонских и каменноугольных отложений центральных антиклинальных поднятий прогиба, приурочены к тем участкам, которые претерпели наибольшую гипергенную переработку в неоген-четвертичную эпоху.

Таким образом, серное минералообразование в пределах Башкирского Приуралья претерпело значительную эволюцию. Начавшись как седиментационно-диагенетический процесс в раннюю пермь, оно в дальнейшем протекало как эпигенетическое рудообразование. Очевидно, при дальнейшем изучении удастся выявить и такие интервалы верхнепалеозойского разреза, в пределах которых эпигенетические процессы сероотложения будут наложены на седиментационно-диагенетические серные руды. О возможности сохранения их свидетельствуют: высокая степень сероводородного заражения бассейнов (показателем чего является алабандин), приуроченность сероносных зон улутеляжской свиты к верхней границе сероводородного заражения современных водоносных комплексов, высокая скорость хемогенной седиментации в иренское время и ненарушенность отложений улутеляжской свиты процессами эрозии в альпийский этап тектогенеза.

## ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПОДГОРНЕНОСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ САМОРОДНОЙ СЕРЫ

Подгорненское месторождение самородной серы выявлено при поисковых работах на серу Западно-Казахстанской комплексной геологоразведочной экспедицией в 1970-1971 гг. Месторождение располагается на площади Подгорненской антиклинали, в центральной части Актюбинского Приуралья, известного своими многочисленными нефте- и газопроявлениями в палеозойских породах.

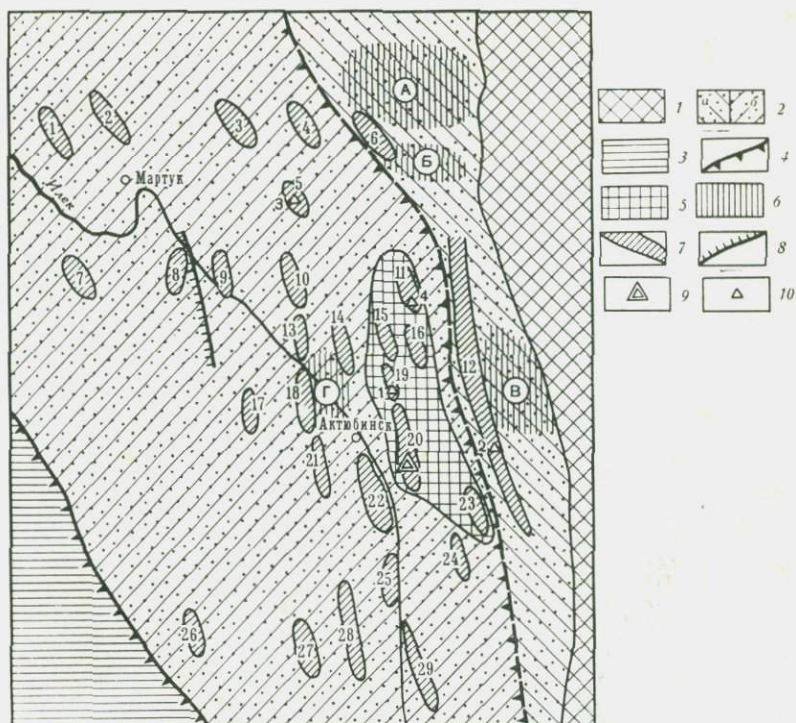
Для района месторождения характерен следующий разрез. Внизу, на глубинах, достигаемых буровыми скважинами, залегают аргиллиты, алевролиты, песчаники и конгломераты артинского яруса нижней перми мощностью свыше 1300 м. Выше расположена каменная соль кунгурского яруса, покрываемая и подстилаемая гипс-ангидритовыми породами с прослоями алевролитов и песчаников. Мощность яруса от 200 до 1000 м. Верхнепермские и триасовые породы представлены переслаиванием красноцветных глин и песчаников; мощность их от 1000 до 3600 м. На различные горизонты кунгура и пермо-триаса с размывом ложатся среднеюрские угленосные песчано-глинистые осадки мощностью до 175 м. Выше с перерывом залегают морские песчано-глинистые породы нижнего мела мощностью до 100 м. Заканчивается разрез суглинками и песчано-гравийными отложениями четвертичного возраста мощностью до 20 м.

По данным А.К. Замаренова (1970), Актюбинское Приуралье представляет собой южное продолжение Предуральского краевого прогиба. В пределах прогиба выделяются структуры второго порядка: Жилинско-Петропавловский уступ и несколько крупных синклиналильных прогибов. Указанные структуры, в свою очередь, осложнены структурами третьего порядка - брахиантиклинальными и антиклинальными складками. Последние имеют хорошо выраженную линейную форму и четкую субмеридиональную ориентацию (фиг. 1).

В складки сматы верхнепалеозойские и триасовые отложения; выделяется семь линий складок. Амплитуда их при движении с востока на запад постепенно уменьшается, в этом же направлении испытывают погружение и слагающие их породы.

Основными структурными формами мезозойских отложений являются так называемые эрозийные ("дизъюнктивные") мульды (Журавлев, 1970). Они заполнены горизонтально залегающими или слабодислоцированными осадками юры и мела. В плане мульды имеют вытянутую форму и располагаются над сводами антиклиналей. Ориентация их совпадает.

Подгорненская антиклиналь располагается на третьей с востока линии складок, вдоль западной границы Жилинско-Петропавловского уступа что лишний раз подтверждает одну из закономерностей тектонических условий размещения серных месторождений в региональном плане, за-



Фиг. 1. Схема тектонического строения Актюбинского Приуралья (по А.К. Замарену)

1 - складчатые сооружения Сакмарско-Уралтауской зоны; 2 - Предуральский краевой прогиб (а - внутренняя зона на геосинклинальном основании, б - внешняя зона на платформенном основании); 3 - юго-восточная окраина Русской платформы; 4 - региональные тектонические нарушения; 5 - Жилианско-Петропавловский выступ; 6 - крупные отрицательные структуры: А — Кемпирсайско-Алимбетская синклираль, Б - Новопокровская мульда, В - Карагалинская синклираль, Г - Бутакская синклираль; 7 - локальные антиклинальные структуры и линейные складки: 1 - Яйсанская, 2 - Восточно-Яйсанская, 3 - Северо-Джусинская; 4 - Андреевская, 5 - Джусинская, 6 - Синтасская, 7 - Горнекская, 8 - Мартукская, 9 - Каратагайская, 10 - Каратаусайская, 11 - Северо-Петропавловская, 12 - Александровско-Белогорская, 13 - Драгомировская, 14 - Гавриловская, 15 - Акташская, 16 - Южно-Петропавловская, 17 - Дженишекская, 18 - Георгиевская, 19 - Жилианская, 20 - Подгорнецкая, 21 - Западно-Актюбинская, 22 - Актюбинско-Бештамакская, 23 - Борлинская, 24 - Табантальская, 25 - Алгинская, 26 - Кокблакская, 27 - Кундактыр, 28 - Самбайская, 29 - Блакская; 8 - крутые флексуры и сбросы; 9 - Подгорнеенское месторождение серы; 10 - проявления серы: 1 - Жилианское, 2 - Белогорское, 3 - Джусинское, 4 - Петропавловское

ключающуюся в их приуроченности к зонам перехода от крупных положительных структур к крупным отрицательным (Соколов, 1958).

Подгорненская складка ориентирована по азимуту  $340^{\circ}$ . Длина ее 28 км. От расположенной севернее Жилианской брахискладки она отделяется субширотным сбросом с амплитудой порядка 400 м. Южное окончание складки, по данным сейсмических исследований, представляет собой периклинальное замыкание с погружением кровли артинских пород на глубину 700 м и более. Складка асимметричная, на восточном крыле углы падения артинских пород  $20-30^{\circ}$ , на западном — до  $60-65^{\circ}$ . К западному крылу приурочен взброс с амплитудой 500–600 м, по которому свод и восточное крыло приподняты и надвинуты на западное крыло (Авров и др., 1970).

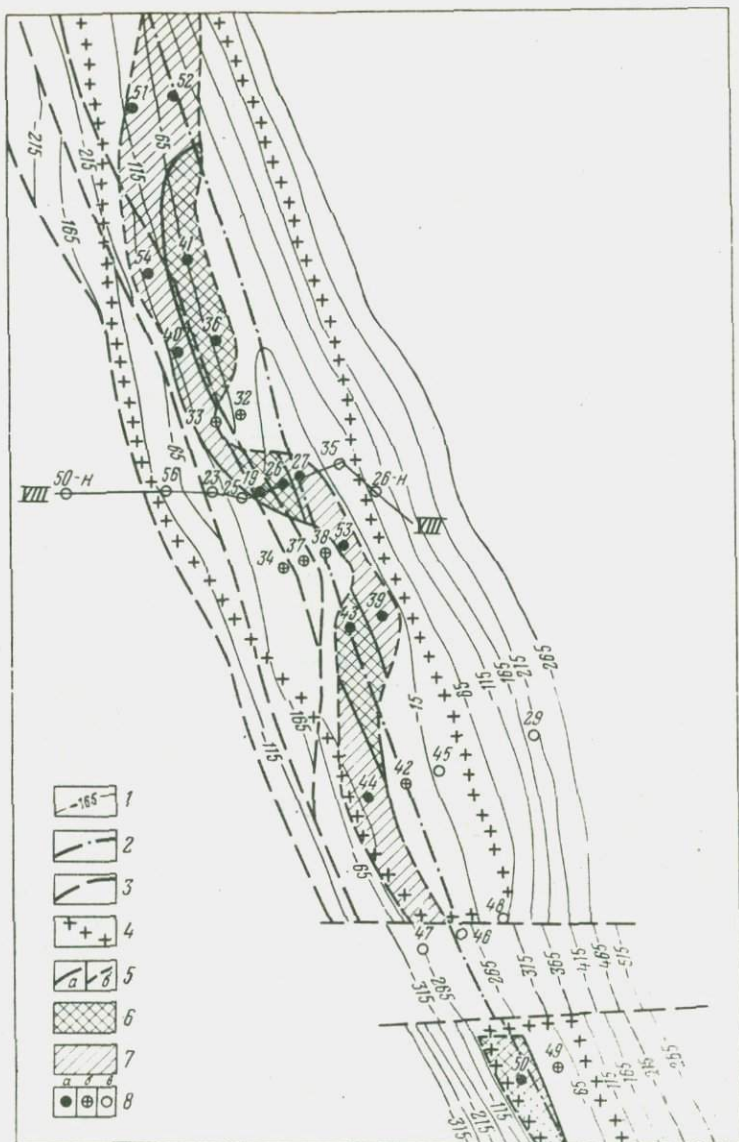
По данным бурения артинские и кунгурские породы в своде Подгорненской складки разбиты разрывными нарушениями на отдельные блоки. Особенно интенсивно дислоцирована западная часть свода, где зафиксированы амплитуды смещения до 100–150 м (фиг. 2 и 3). Причем как вдоль, так и вкрест простирания структуры опущенные блоки сменяются приподнятыми.

Благодаря проявлению соляной тектоники каменная соль кунгура на значительной части площади антиклинали полностью перемещена на крылья. Из-за этого на большей части свода в полосе шириной от 200 до 1000 м каменная соль отсутствует. Длина этой полосы равна 19 км. Полоса отсутствия солей в своде не является непрерывной. Отмечаются участки с каменной солью в разрезе; они располагаются там, где в своде антиклинали имеются опущенные блоки, ограниченные субширотными сбросами, с амплитудой смещения порядка 150 м. Таким является участок профиля IV–IV, где скв. 46 вскрыла толщу солей мощностью 130 м.

Наличие разрывных нарушений в кунгурских и артинских породах антиклинали открыло доступ в сульфатную толщу кунгура высокоминерализованных нефтяных вод и углеводородов, что является одним из условий, приводящих к процессам серообразования (Соколов, 1958, 1969).

В сводовой части Подгорненской антиклинали сульфатные породы кунгура также претерпевают значительные изменения. Они выражаются в том, что иногда значительно уменьшается общая мощность сульфатов, от 350–250 до 150–100 м, а также резко изменяется вещественный состав в сторону преобладания карбонатных пород над сульфатными. Эти карбонатные породы можно рассматривать как вторичные, образовавшиеся по гипсовым породам. Чистые разновидности гипса переходят в известняк, глинистый гипс — в мергель, загипсованная глина — в карбонатную глину.

На крыльях антиклинали кунгурские породы перекрываются согласно налегающими на них красноцветными породами верхней перми и триаса. В своде красноцветные отложения отсутствуют. Вместо них с резким размывом на кунгур ложится среднеюрская песчано-глинистая толща, часто содержащая маломощные прослои бурого угля. Площадь распространения максимальных мощностей юрских отложений примерно совпадает с полосой отсутствия солей над сводом антиклинали. Следует отметить, что наличие вытянутой мульды, заполненной юрскими породами, над сульфатной толщей кунгура играет роль так называемого "окна фильтра-



Фиг. 2. План серной залежи Подгорненского месторождения (Южный участок)

1 - изогипсы кровли артинского яруса; 2 - ось антиклинали; 3 - предполагаемые разрывные нарушения; 4 - контур полосы отсутствия солей; 5 - контур серной залежи (а - установленный, б - предполагаемый); 6 - наиболее богатое и мощное осернение; 7 - бедное осернение; 8 - поисковые скважины (а - рудные, б - с серной минерализацией ниже 5%, в - пустые)

ции кислорода в сульфатную толщу, что является необходимой предпосылкой для образования месторождения серы метасоматического типа (Краткое..., 1968; Горбачев, 1968).

Особенности локализации серного оруденения на Подгорненской антиклинали устанавливаются при рассмотрении данных, полученных по ее южной части, где выявлена полоса осерненных пород протяженностью 5 км и шириной 200–300 м.

Промышленная серная минерализация приурочена к сульфатной толще кунгура там, где в разрезе отсутствует или резко сокращена в мощности соляная толща. При этом контур осерненных пород в плане располагается в пределах контура эрозионной мульды, заполненной осадками средней юры и нижнего мела (см. фиг. 3).

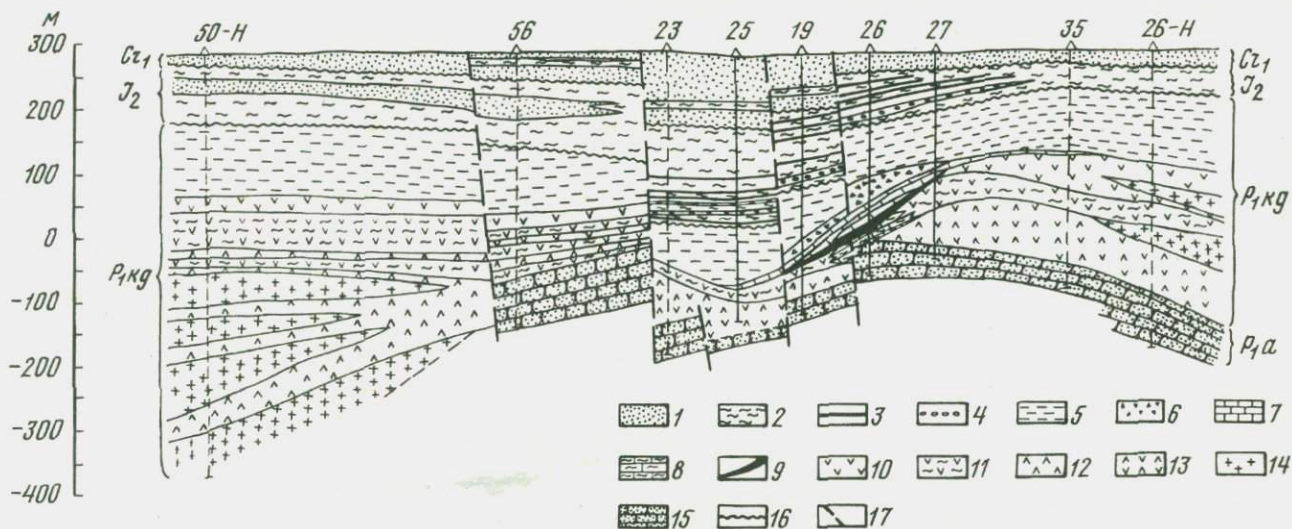
Там, где развита серная минерализация, сульфатные породы преобразованы в карбонатные. Этот факт находит объяснение в химических реакциях, происходящих в зоне формирования метасоматических серных месторождений (Соколов, 1969). Преобразованными оказываются различные части сульфатной толщи. Часто карбонатизация охватывает всю толщу целиком. Такой факт констатирован в узкой полосе, проходящей с севера на юг через скв. 36, 32, 26, 37 и 38. Для этого участка характерно общее сокращение мощности сульфатной толщи до минимума и часто интенсивное осернение (скв. 36 и 26). Наиболее широко распространены карбонатизация и осернение верхней части сульфатов (участок между профилями VI–VI и XI–XI). Карбонатизация и осернение в средней части сульфатов были зафиксированы в скв. 50. Серно-карбонатная минерализация в нижней части сульфатов встречена скв. 51, 52, 50, 44 и 49.

При рассмотрении взаимоотношений серного оруденения с различными элементами тектонической структуры намечаются следующие закономерности. Промышленные концентрации серы при наибольших мощностях руды характерны для полосы, примыкающей с запада непосредственно к шарниру складки. Это наиболее приподнятая часть структуры.

Для узкого опущенного блока, примыкающего с запада к указанной полосе, характерна бедная серная минерализация, редко достигающая промышленных концентраций, причем мощности рудных интервалов не превышают 1 м. Для полосы свода, примыкающего с востока к шарниру складки, характерна небольшая мощность карбонатизированных и осерненных пород. Мощности серной руды составляют здесь 1,0–1,5 м при содержании серы 10–14%. В скважинах, наиболее удаленных от шарнира на восток, серная минерализация отсутствует, а мощность вторичных карбонатов не превышает 10 м.

Следует отметить, что на Подгорненском месторождении, как и на других хорошо изученных месторождениях, отмечается связь серного оруденения с разрывными нарушениями (см. фиг. 3).

В заключение следует отметить, что серное оруденение, по-видимому, имеет место на всем протяжении указанной выше полосы, в пределах которой в разрезе кунгура отсутствует каменная соль. Это обстоятельство позволяет предполагать, что Подгорненское месторождение серы будет представлять промышленный интерес.



Фиг. 3. Геологический разрез по линии VIII-VIII (см. фиг. 2)

1 - 4 - среднеюрские и нижнемеловые отложения ( $J_2 + Cg_1$ ): 1 - песок, 2 - глина, 3 - бурый уголь, 4 - конгломерат; 5 - 14 - кунгурские отложения ( $P_1kg$ ): 5 - алевропесчаник, 6 - брекчия, 7 - известняк, 8 - мергель и карбонатная глина, 9 - серная руда, 10 - гипс, 11 - гипсово-глинистая порода, 12 - ангидрит, 13 - гипс-ангидрит, 14 - каменная соль; 15 - аргинские отложения ( $P_1a$ ) - переслаивание песчаников, алевролитов, аргиллитов и гравелитов; 16 - перерыв в осадконакоплении; 17 - предполагаемые разрывные нарушения

Особенности локализации серниого оруденения свидетельствуют об эпигенетической природе месторождения. По классификации А.С. Соколова оно относится к типу метасоматических по гипсу.

#### Литература

- Авров П.Я., Дальян И.Б. Актыбинское Приуралье. - В кн.: Геология СССР, т. XXI, ч. I, кн. 2. М., "Недра", 1970.
- Горбачев М.Г. Структурно-тектонические закономерности размещения и строения месторождений самородной серы Амударьинского сероносного региона. - Труды Геол. ин-та, вып. 20. Казань, 1968.
- Журавлев В.С. Мезо-кайнозойские ("дизъюнктивные") мульды Актыбинского Приуралья. - В кн.: Геология СССР, т. XXI, ч. I, кн. 2. М., "Недра", 1970.
- Замаренов А.К. Средний и верхний палеозой восточного и юго-восточного обрамления Прикаспийской впадины. Л., "Недра", 1970.
- Краткое методическое руководство по прогнозу месторождений самородной серы среди осадочных образований. Изд. Геол. ин-та. Казань, 1968.
- Соколов А.С. Основные закономерности геологического строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. - Сов. геол., 1958, №5.
- Соколов А.С. Состояние и основные проблемы геологических исследований по самородной сере. - В кн.: Геология месторождений самородной серы. М., "Недра", 1969.

## ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ГЕНЕЗИС ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ НА ГАУРДАКСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СЕРЫ

В результате сернокислотного выветривания месторождений самородной серы образуются зоны окисления с комплексом минеральных новообразований и геохимических особенностей, которые могут играть роль прямого поискового признака на месторождения серы, имеющего значение как регионального, так и локального характера (Краткое ..., 1968).

В практике поисково-разведочных работ на самородную серу в Гаурдак-Кугитангском районе (Лазарев и др., 1971) используются данные, прямо или косвенно указывающие на наличие процессов сернокислотного выветривания: минеральные новообразования; выщелачивание, закарстованность и субтерральные отложения; измененные глинистые породы (трепеловидные и оквасцованные); корродированные зерна и кристаллы серы; высокие значения окислительно-восстановительного потенциала и пониженные величины рН подземных вод и приповерхностных грунтов; специфический едкий запах окисляющихся сероносных пород.

На Гаурдакском месторождении четвертая часть серных руд находится в пределах современной зоны аэрации и подвергается карстованию и окислению. В этой зоне устанавливается в основном нисходящее движение кислородсодержащих атмосферных вод, фильтрующихся через относительно маловодопроницаемую толщу гипс-ангидритов в местах их тектонической нарушенности. Нижние части залежей, ниже абсолютной отметки +480 м, расположены в зоне насыщения, где распространены артезианские минерализованные воды с высоким содержанием сероводорода. Эта зона характеризуется восстановительными условиями и определяет среду, благоприятную для сохранения ("консервации") серных руд.

Гаурдакское месторождение находится в типично аридных климатических условиях. Климатические особенности и отсутствие по существу выходов серных руд горизонтов "F" и "D" на дневную поверхность не обуславливают интенсивное и широкое развитие процессов их окисления в зоне аэрации. Продукты окисления, в основном сульфаты и свободная серная кислота, остаются или на месте их образования, или претерпевают незначительную миграцию.

Характер процессов окисления содержащих серу пород различного литологического состава неодинаков. На эту особенность указывают М.В. Иванов (1964) и Н.П. Юшкин (1971) на примерах серных залежей в Каракумах, Шорсу, Гаурдаке, Предкарпатье. На Гаурдакском месторождении можно выделить: 1) зону окисления серно-кальцитовых метасоматических руд горизонта "F"; 2) зону окисления известняковых серных руд горизонта "D"; 3) "шляпу" сернокислотного выветривания терригенно-глинистых меловых пород на I участке.

### Зона окисления серных руд горизонта «F»

Все выявленные серные залежи горизонта "F" охвачены зоной окисления. Они подвергаются достаточно равномерному сернокислотному выветриванию с некоторой интенсификацией в местах проявления пострудной тектоники и в кровле залежей. Процессы сернокислотного выветривания руд сопровождаются карстовыми явлениями, что приводит к образованию различных полостей: пор, каверн, закарстованных трещин, каналов, пещер. Закарстованность серных руд горизонта составляет в среднем 10%.

Процессы карстования, выщелачивания и окисления карбонатных серных руд сопровождаются их огипсованием (табл. 1). Поэтому стенки многих полостей имеют гипсовую оторочку.

Таблица 1

Минеральный состав серных руд Гаурдакского месторождения  
(усредненные показатели, в %)

Компоненты	Залежи горизонта "F"		Залежи горизонта "D"	
	Зона сернокислотного выветривания (окислительная среда)	Зона "консервации" (восстановительная среда)	Зона сернокислотного выветривания (окислительная среда)	Зона "консервации" (восстановительная среда)
Сера самородная	27,2	32,0	18,5	22,7
Кальцит	43,0	58,5	50,0	62,0
Гипс и ангидрит	27,0	12,0	30,0	14,0
Прочие минералы	2,8	2,5	1,5	1,3

Гипсы представлены мелко-, средне- и крупнозернистыми агрегатами и друзами кристаллов столбчатого, игольчатого и пластинчатого габитуса. Часто встречаются двойники "ласточкин хвост" нередко значительных (0,5-1 м) размеров.

Местами в приконтактных участках сплошному огипсованию подвергаются блоки серной руды размером до 5-10 м, причем процессы огипсования нередко имеют хорошо выраженный метасоматический характер. Образующиеся тонко- и мелкозернистые гипсы сохраняют текстурный рисунок замещаемой руды, а внутри блоков вторичных гипсов отмечаются реликтовые включения незамещенных серно-кальцитовых руд.

Анализ изотопного состава серы вторичных гипсов показывает, что они являются более легкими ( $\delta S^{34}$  = от +1,3 до +8,1‰) по отношению к ангидритам вмещающей толщи ( $\delta S^{34}$  = от +13,4 до +15,9‰) и обра-

Минерал	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO
Галлуазит	38,64	35,00	1,05	-	-	0,20	1,22
Алунит	0,18	36,70	0,32	-	-	0,20	0,88
Мелантерит	-	-	-	25,80	0,10	-	0,17

зовались в основном за счет сульфат-ионов, возникающих при окислении элементарной серы ( $\delta S^{34}$  = от +1,4 до +3,6‰). Местами в процессе кристаллизации вторичных гипсов принимали участие сульфат-ионы, возникшие при растворении "нормальных" ангидритов, что и привело к некоторому "утяжелению" вторичных гипсов по сравнению с элементарной серой.

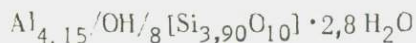
По кристаллам гипса, особенно в верхних горизонтах зоны окисления серных залежей "F", развиты псевдоморфозы минерала молочно-белого и светло-кремового цвета. Наиболее легко замещение происходит по трещинам спайности. Контакты в одних местах резкие, в других постепенные. Рентгеновское и термическое исследования белых продуктов, образовавшихся в результате выветривания гипса, показали их принадлежность к ангидриту. Дегидратация гипсов обусловлена, вероятно, действием свободной серной кислоты, образующейся при окислении элементарной серы.

В окисленных гипсо-известняковых серных рудах впервые для экзогенных месторождений самородной серы встречен галлуазит. Руды кавернозные, стенки каверн выполнены гипсом, кальцитом и серой. Повсеместно развиты гидроокислы железа. В серных рудах обнаруживаются вкрапленники пластинчатых, различно ориентированных гипсов, содержащих обильные включения галлуазита. Выделения галлуазита в виде неправильных пятен также распространены среди окисленной серной руды. По узким тонким трещинам галлуазит проникает в агрегаты зерен серы, наблюдается в виде каемок вокруг эллипсоидных ее вкрапленников, обычно нарастая при этом не на серу, а на тонкую прослойку мельникова.

Во влажном состоянии галлуазит вязкий, глиноподобный, жирный на ощупь. На сухом воздухе становится плотным, опаловидным. Цвет минерала голубоватый, синевато-белый, белый, серый, желтый до буровато-желтого. Мыловидный галлуазит обычно сопровождается гипсом.

Под микроскопом галлуазит представлен мелкочешуйчатым агрегатом, частички которого имеют размеры 0,001-0,005 мм. Измеряется только один показатель преломления, колеблющийся от 1,502 до 1,552.

Состав минерала (табл. 2) близок к теоретическому:



горизонта "F" (в вес. %)

Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Н.о.	Сумма
0,22	0,12	21,36	2,42	-	100,23
2,12	5,93	17,28	36,20	-	99,81
-	-	45,50	28,90	0,33	100,80

По мере уменьшения количества воды наблюдается переход от галлуазита, дающего на дифрактограмме рефлекс 10 Å, к галлуазиту с рефлексом 7 Å.

Кривая ДТА галлуазита характеризуется эндотермическими эффектами при 150° (удаление кристаллизационной воды) и 600°С (выделение конституционной воды). Экзотермический пик при 980°С вызван кристаллизацией глинозема и кристобалита.

С галлуазитом ассоциирует белый тонкозернистый алунит, по внешнему виду часто почти не отличающийся от галлуазита. Зерна алунита имеют агрегационное строение, в них измеряется только один показатель преломления, колеблющийся от 1,554 до 1,567.

Кривая ДТА алунита характеризуется тремя эндотермическими эффектами с максимумами при 170,600 и 845°С, соответственно связанными с потерей кристаллизационной воды, выделением группы OH и диссоциацией сернокислого алюминия с выделением газовой фазы. Экзотермический эффект при 720°С является результатом распада алунита, диссоциацией квасцов и кристаллизацией новых соединений.

Дифрактограмма минерала обнаруживает все присущие ему отражения (4,93; 3,49; 2,98; 2,25; 1,895; 1,743; 1,485 Å и др.).

Окислительно-восстановительный потенциал, измеренный в серных рудах в местах развития галлуазита и алунита, имеет величину от +485 до +675 мВ при pH от 3,3 до 2,5, что свидетельствует о весьма интенсивном развитии процесса окисления в этих зонах.

Одним из специфических образований являются субтерральные отложения в карстовых полостях серных залежей горизонта "F" (Лазарев, Вдовиченко, 1970). Большинство крупных полостей выполнены хемогенно-кольматационными глинистыми образованиями, среди которых встречаются такие вторичные минералы как сера скрытокристаллическая, пылевидная или в виде желваков и прожилков, и мелантерит.

Вмещающая порода представляет собой измененную гидрослюдистомонтмориллонитовую глину. Новообразованная сера, представленная частью мелкозернистой (пылевой) разностью, имеет светло-желтую окраску. Дифрактограмма серы обнаруживает хорошее сходство с межплоскостными расстояниями ромбической серы.

Изотопный состав скрытокристаллической серы субтерральных отложений ( $\delta S^{34}$  = -7,4‰) аналогичен составу явнокристаллической гидро-

генной серы, в то время как сульфаты этих отложений имеют такой же изотопный состав ( $\delta S^{34} = +14,6\%$ ), как и первичные ангидриты. Вероятно вторичная сера в субтерральных отложениях образовалась за счет окисления газообразного сероводорода, мигрирующего из обводненных горизонтов сероносных залежей.

Мелантерит наблюдается в виде корочек и налетов на плоскостях наслоения глины. Корки мелантерита состоят из волокнистых кристаллов длиной 1,5 см, "С"- и "S"-образно изогнутых или располагающихся косо к субстрату. Мелантерит голубовато-зеленый. Показатели преломления  $n_g = 1,486$ ;  $n_p = 1,478$ .

Химический состав (табл. 2) отвечает теоретической формуле мелантерита  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ . Дифрактограмма минерала обнаруживает все признаки мелантериту отражения (4,9; 3,78; 3,18; 2,67 Å).

### Зона окисления серных руд горизонта «D»

Серная залежь горизонта "D" приурочена в основном к пластам и линзам маркирующих известняков гаурдакской свиты на II участке месторождения, где суммарная мощность известняков 30–40 м. Спорадическое осернение в пластах маркирующих известняков встречается на всей площади месторождения. Богатое осернение в горизонте "D" приурочено в основном к зонам дробления и трещиноватости, поэтому процессы окисления закономерно локализируются в этих же зонах.

Вне зон дробления и трещиноватости осерненные пласты и пропластки маркирующих известняков подвергаются сернокислотному выветриванию, главным образом в местах их выходов на дневную поверхность (районы шахты 2 на III участке и карьера "Северный" на IV участке). Минеральный состав серных руд залежи горизонта "D" приведен в табл. 1.

Характер процессов окисления известняковых серных руд горизонта "D" и образующиеся при этом вторичные продукты в целом аналогичны зоне окисления серных руд горизонта "F". Однако закарстованность выражена слабее: поры, каверны, закарстованные трещины, небольшие полости. Крупные пещеры отсутствуют. Огипсование, наоборот, выражено более интенсивно, причем гипсы мелко- и среднезернистые как правило нацело замешают достаточно крупные блоки трещиноватых и дробленых серовмещающих известняков. Крупнопластинчатые гипсы, большие столбчатые кристаллы и двойники типа "ласточкин хвост" встречаются редко.

Гипс часто представлен мутноватыми зернами и пластинками, включающими вкрапленники светло- и зеленовато-желтой серы. Контурные зерна серы неправильные. Некоторые зерна обнаруживают явные признаки растворения, в таком случае вокруг серы наблюдаются небольшие пустотки. Поверхность зерен серы вследствие процессов растворения мутная. На границах гипсов с известняками отмечаются тонкие каемки окислов железа.

Ангидрит, замещающий гипс, наблюдается в виде легко крошащейся зернистой массы, слоистых, шестоватых и игольчатых агрегатов, унаследовавших текстуру гипса. Цвет его белый, серый, кремовый до бурого.

го на контакте с гипс-карбонатной породой. Кисловатый привкус ангидрита свидетельствует о присутствии свободной серной кислоты.

В продуктах обезвоживания гипса больший показатель преломления колеблется от 1,598 до 1,606, а меньший – от 1,555 до 1,570. Оба показателя преломления несколько ниже таких же констант ангидритов.

Результаты термического и рентгеновского исследований показали, что естественные продукты обезвоживания гипса представлены ангидритом, либо смесью гипса и ангидрита. Фаза полугидрита в них отсутствует.

На контакте руд горизонтов "D" и "F" встречены мелкозернистые гипсы, покрытые пестрым (голубовато-зеленоватым, серовато-голубым, фиолетовым) налетом. Из данных химических анализов следует, что налеты в основном соответствуют гипсу с незначительной примесью других компонентов. Они характеризуются повышенным содержанием закисного железа, заметной примесью  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ . Такие компоненты вместе с серой и кислородом могут давать соединение состава  $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{S}_2\text{O}_{12}$  – ультрамарин<sup>1</sup>. По отношению к воздуху и воде ультрамарин вполне устойчив. Кислоты способствуют его разложению на  $\text{H}_2\text{S}$  и кремневую кислоту.

Субтерральные отложения в карстовых полостях горизонта "D" встречаются реже и представлены терригенно-глинистым материалом: глины и суглинки разного цвета, часто слоистые; глинистые конгломераты с галькой нижнемеловых пород; образования типа терра-росса и остаточных терригенных продуктов выщелачивания известняков.

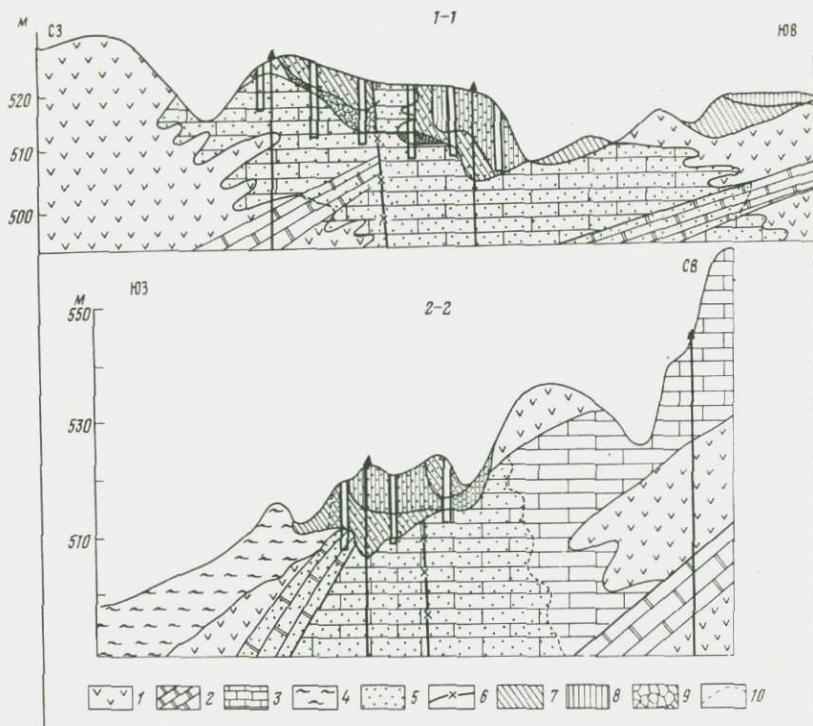
### «Шляпа» сернокислотного выветривания

«Шляпа» сернокислотного выветривания приурочена к южному периклинальному замыканию Гаурдакского поднятия и расположена в зоне несогласного контакта обрушенных терригенно-глинистых нижнемеловых пород с гипс-ангидритами и известняками гаурдакской свиты. Орографически площадь эта представляет собой пологий склон оврага, изрезанный более мелкими продольными и поперечными оврагами, образующими довольно расчлененный рельеф.

Останцы неизменных пород нижнего мела залегают повсеместно на размытой кровле пород гаурдакской свиты и представлены вблизи «шляпы» кирпично-красными и зеленовато-серыми глинами с повышенным содержанием кварца и карбоната, а также полимиктовыми песчаниками с карбонатно-глинистым цементом (фиг. 1). Для глин характерно наличие включений гипса-селенита. Подобные гипсоносные пласты глин фиксируются в нормальных разрезах указанных ярусов нижнего мела на территории всего Гаурдакского района.

Породы гаурдакской свиты залегают на известняках оксфорда и представлены толщей гипс-ангидритов и известняков суммарной мощностью

<sup>1</sup> Предположение об отнесении пестрых налетов на гипсах к ультрамарину нуждается в дополнительном исследовании.



Фиг. 1. Схематические геологические разрезы "шляпы" сернокислотного выветривания на I участке

1 - гипс-ангидриты гаурдакской свиты; 2 - седиментогенные известняки гаурдакской свиты; 3 - эпигенетические известняки; 4 - глины обрушенных меловых отложений; 5 - бедное осернение; 6 - разрывные нарушения; 7-9 - породы "шляпы": 7 - бурые и темно-бурые глины, 8 - серовато-бурые трепеловидные породы, 9 - обломки известняков, брекчии; 10 - граница развития бедного осернения

80-160 м. Для разреза гаурдакской свиты на I участке выделяются две генерации известняков: седиментогенные, соответствующие маркирующему горизонту, и эпигенетические, образованные путем метасоматического замещения кальцитом сульфатной части разреза (Лазарев, Мамчур, 1969).

Обе указанные разновидности известняков достаточно интенсивно закарстованы: поры, каверны, закарстованные трещины, небольшие полости и реже пещеры. В верхней части толщи известняков карстовые пустоты сплошь или частично выполнены радиально-лучистым зональным кальцитом светло-коричневого и коричневого (медового) цвета с образованием колломорфно-полосчатых, жеодовых, секреторных, почковидных текстур.

Сера в известняках распределена неравномерно. В основном мелкие ее кристаллики и зерна приурочены к стенкам карстовых пустот и трещин, покрытых гипс-кальцитовой корочкой. Редко совместно с серой встречаются скопления мелких кристалликов пирита. Иногда осернение развивается по радиально-лучистому кальциту, повторяя его форму. Местами тонкозернистая сера образует налеты и корочки на стенках пустот, которые в свою очередь покрыты сажистым налетом черного битуминозного вещества. В целом осернение убогое и не превышает в среднем 2-3%. Небольшие и редкие серно-кальцитовые гнезда и линзы с более богатым осернением (до 20%), приуроченные к гипс-ангидритовым включениям (шурфы 14, 16), имеют метасоматическую природу. В шурфах 5, 7, 8, 9 на кровле известняковой толщи залегает слой, состоящий из брекчии - глыб этих же известняков, сцементированных глиной. Обломки выщелочены, имеют ноздреватый вид. Стенки пустот покрыты глинистой коркой или нацелл заполнены глиной. В этой породе отмечается осернение, аналогичное нижележащим известнякам, причем сера находится в пустотах и цементирующих глинах.

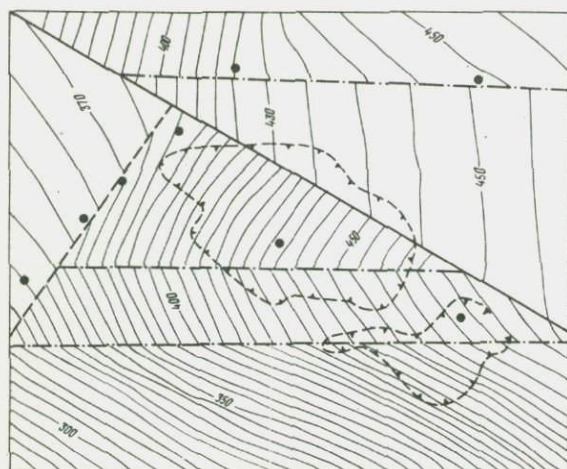
Вскрытые шурфами крупные карстовые полости внутри известняковой толщи выполнены субтерральными отложениями, представленными двумя разновидностями: 1) пестроокрашенной известковистой глиной, влажной, кислой, с редкими включениями зерен серы; 2) известковистой глиной серого и темно-серого цвета, влажной, пластичной, кислой, с включениями квасцов и серы. Осерненные участки этих глин содержат сероводород. Как отмечал В.П. Мирошниченко, при проходке шурфов из трещин и пустот в известняках выделялся сероводород или ощущался его сильный запах, а по шурфам 5 и 9 зафиксировано выделение метана. В шурфе 9 на глубинах 8 и 13 м встречена кислая вода.

Структурно-тектонические особенности района "шляпы" показаны на фиг. 2. Блоковые разрывы первой стадии тектогенеза образовали зону дробления в породах гаурдакской свиты, где гипс-ангидриты подверглись замещению эпигенетическими известняками (Лазарев, 1972а). Нарушения второй стадии тектогенеза наложились на сформированную карбонатную толщу. В дальнейшем проявление этой стадии выразилось в пострудных дислокациях, отразившихся также в трепеловидных породах "шляпы" (например линия пещер "В", "Е", "А"; линия скв. 311, пещера "С", скв. 1).

В современных границах "шляпы" сернокислотного выветривания выделяются четыре разновидности пород.

1. Небольшие линзы-останцы не проработанных кислотой нижнемеловых глин. Залегают на выветрелых гипсах вблизи пещеры "D" и скв. 311 и в кровле трепеловидных пород у шурфов 4, 10 и 16. Гипс в глинах присутствует в виде мелких корродированных зерен и тонких пластинок. В этой разновидности пород самородная сера отсутствует.

2. Затронутые сернокислотной проработкой глины, которые частично сохранили первоначальный состав и облик (пещеры "А", "D", скв. 311). В глинах имеется значительная примесь гипса и его включения в виде вытянутых полупрозрачных пластинок, разделенных по центру границей кристаллизации на две части. Вблизи дневной поверхности гипс переходит



Фиг. 2. Структурный план по кровле известняков гиссарской свиты на площади "шляпы" сернокислотного выветривания на I участке

1 - разрывные блоковые нарушения первой стадии тектогенеза; 2 - разрывные блоковые нарушения второй стадии тектогенеза; 3 - изогипсы кровли известняков гиссарской свиты; 4 - граница "шляпы" сернокислотного выветривания; 5 - скважины

в белый ангидрит. "Пластинки" ангидрита состоят из густосросшихся мелких радиально-лучистых игольчатых агрегатов. Порода разбита густой сетью тонких трещин, по стенкам которых наблюдаются темно-бурые налеты битума. Глины кислые, при раскопке отмечается специфический запах. В местах повышенной влажности (на склонах оврагов и в полостях выветривания) в глинах образуются налеты и корочки ярко-оранжевого ярозита и ватоподобных квасцов белого и светло-зеленого цвета.

В пещере "В" между слоем серой (первичной) глины, состоящей в основном из гидрослюды, и слоем трепеловидных пород, состоящих из кремнезема, обнажается толща переходных пород, представленных гидрослюдистыми глинами с повышенным содержанием кремнезема и примесью гипса и алунита. В этой части "шляпы" в породах, затронутых сернокислотной проработкой, самородная сера не обнаружена.

Для северо-западной части "шляпы" характерно наличие самородной серы в глинах. Осернение бедное и среднее, неравномерное. Мелкие кристаллы серы образуют небольшие гнезда, реже вкрапленники в общей массе или по трещинам. Иногда более крупные (до 0,5 см) зерна серы включены в кристаллах гипса. Сера двух генераций. Основная масса - явнокристаллическая, лимонно-желтого цвета. В шурфе 7 встречена скрытокристаллическая сера, образующая в глине мелкие гнезда.

3. Трепеловидные породы - конечный продукт сернокислотной проработки глин. Выход у скв. 311 представлен в нижней части белой, мелоподобной, жирной на ощупь породой, выше порода слабо-желтоватая, более плотная. Те и другие пронизаны прожилками полупрозрачного пластинчатого гипса с реликтами селенитовой структуры. Переходов гипса в ангидрит не наблюдается. Запах серной кислоты не ощущается (рН=6), самородная сера отсутствует.

У пещеры "D" обнажается трепеловидная порода светло-серого и светло-желтого цвета, трещиноватая, слабобрекчированная, с поверхности выветрелая, ноздреватая. По трещинам и кавернам много белых волокнистых и столбчатых кристаллов квасцов. Ощущается сернокислотный запах. Самородная сера отсутствует.

Трепеловидные породы у пещер "B" и "E" характеризуются светло-серым цветом, трещиноватостью и брекчированностью. Породы выветрелые и имеют ноздреватый вид. В пещере "B" среди этих пород широко развит алунит, в меньшей степени ярозит (табл. 3). Алунит представляет собой мелкозернистую породу, жирную на ощупь, мажущую руки и липнущую к языку, местами крепкую, фарфоровидную, имеющую раковистый излом. Принадлежность минерала к алуниту подтверждается рентгеновским исследованием.

Ярозит представляет собой грязно-желтую мелкозернистую породу, крепкую, местами рыхлую, пачкающую руки. Все межплоскостные расстояния образца отвечают ярозиу.

По всей толще развиты прожилки полупрозрачного пластинчатого гипса. В пещере "E" отмечается переход гипса в белый ангидрит. Включения квасцов представлены изогнутыми кристаллами столбчатого, волнолистного, игольчатого габитуса, а также в виде налетов и корок. Самородная сера отсутствует; pH водной вытяжки трепеловидных пород в пещере "B" равен 1,5-2, а в пещере "E" - 1,0 и менее.

Трепеловидные породы, вскрытые шурфами 5, 8, 10, 11 и обнажающиеся в пещерах "A" и "C" низкой твердости, имеют светло-серую и буровато-серую до коричневой окраску, высокую кислотность (pH повсеместно ниже 1), содержат включения и прожилки ангидрита с реликтами незамещенного полупрозрачного пластинчатого гипса и селенита. Породы тонко трещиноватые, брекчированные, с большим количеством пустот. Стенки трещин и пустот покрыты налетом черных и бурых битумов.

Ангидрит, развивающийся по селениту, - белый минерал, мягкий с кисловяжущим привкусом, содержит свободную серную кислоту. Дифрактограмма образца почти в точности соответствует ангидриту. Примесь гипса фиксируется отражениями 2,77 и 7,4 Å (интенсивность 0,5).

Ангидрит, развивающийся по гипсу (см. табл. 3) представляет собой белую зернистую массу, сравнительно рыхлую, кислую на вкус; присутствует свободная серная кислота. Значения межплоскостных расстояний и интенсивность указывают, что образец состоит преимущественно из ангидрита.

Сера встречается в виде трех генераций. Лимонно-желтая мелко- и среднезернистая отмечается в пещере "A" в породах и кавернах. В шурфах и пещере "C" сера зеленого цвета образует корочки и прожилки или рассеяна в виде мелких кристаллов в пустотах и трещинах. Реже встречаются гнезда среднекристаллической серы, ассоциирующей с прожилками пластинчатого гипса. В устье пещеры "C" зафиксировано гнездо скрытокристаллической волокнистой серы, образующей радиально-лучистые агрегаты светло-желтого цвета.

Необходимо отметить следующие генетические особенности: 1) характер осернения и формы выделений серы в подстилающих "шляпу" из-

Минерал	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO
Алунит	5,74	Не обн.	35,00	Не обн.	0,59	Не обн.	0,18	Не обн.
Ярозит	3,70	0,22	8,59	35,68	0,37	"	0,21	"
Ангидрит	6,80	Следы	0,31	Не обн.	0,09	"	0,36	31,85

вестняках, брекчиях, субтерральных отложениях и непосредственно в породах "шляпы" свидетельствуют о наложении серной минерализации (тип выполнения); 2) малые количества отложившейся серы и локализация ее только в одной (северо-западной) части "шляпы", а также слабо выраженные кристалломорфологические факторы интенсивного окисления агрегатов серы убеждают в подчиненной роли самородной серы в продуцировании значительных количеств серной кислоты, принявшей участие в формировании "шляпы" сернокислотного выветривания; 3) ближайшая серная залежь горизонта "F" (II участок) расположена в 500 м от "шляпы" и ограничена водоразделом. Распространенное мнение, что карбонатная толща гаурдакской свиты участка I ранее представляла собой нормальную серную залежь горизонта "F", в которой сера затем подвергалась окислению и выщелачиванию, не подтверждается геолого-генетическими данными и особенностями процессов окисления серы в аридных климатических условиях.

Генезис "шляпы" сернокислотного выветривания необходимо рассматривать, очевидно, с позиций условий формирования серных залежей месторождения и выявленных стадий эпигенетической минерализации (Гуревич и др., 1967; Беленицкая, 1969; Лазарев, 1972 б).

Карбонатная толща гаурдакской свиты образовалась здесь в стадию минерализации, с которой на месторождении связано формирование целестин-кальцитового горизонта "K".

В период эрозионной деятельности древней речной сети на площади месторождения были размыты каменная соль и частично кровля гипс-ангидритов гаурдакской свиты, а на I участке - кровля известняков карбонатной толщи. Очевидно размыв указанных пород имел характер межпластового выщелачивания, в результате чего происходили обрушения вышележащих терригенно-глинистых пород нижнего мела и обусловленные этим экзотектонические явления (Седлецкий, 1965). Известняки подверглись карстованию, а контактирующие с ними меловые породы - брекчированию и дроблению.

В рудную стадию минерализации сероотлагающие растворы через известняки карбонатной толщи проникали в покрывающие их глины. Окисление сероводорода молекулярным кислородом, поступающим с инфильтрационными водами, приводило к отложению малых количеств самородной серы в трещинах и пустотах тех и других пород. Сероводород проникал

выветривания (в вес. %)

Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	S <sub>эл</sub>	C <sub>орг</sub>	Сумма
3,45	5,50	15,39	0,54	Не обн.	33,78	Не обн.	0,75	100,92
4,80	3,00	11,00	0,40	"	31,98	"	0,14	100,05
0,13	0,18	1,89	3,48	"	49,80	5,51	0,34	100,74

из глубинных зон I участка совместно с углеводородами нефтяного ряда и метаном, оказывающими тормозящее влияние на процесс серообразования. Наличие повышенных концентраций углеводородов на I участке, расположенном непосредственно в зоне Узункудукского разлома, по сравнению с другими участками месторождения, установлено разведочным бурением. Эманации метана были зафиксированы также при проходке шурфов на площади "шляпы". Следовательно, часть кислорода расходуется на окисление метана и нефтяных углеводородов, что приводит к отложению совместно с серой битумов.

По мере денудации пород, интенсифицированной пострудными тектоническими дислокациями, увеличивался приток кислородосодержащих вод. Избыток кислорода приводил к окислению H<sub>2</sub>S сероводорода не только до элементарной серы, но и далее до серной кислоты. Кислые растворы, воздействовавшие на известняки карбонатной толщи, способствовали их выщелачиванию. В трещинах и пустотах отлагался вторичный гипс.

Воздействие кислых растворов на глины приводит к их химическому преобразованию. Очевидно, процесс сернокислотной проработки глин носит метасоматический характер. Конечным продуктом метасоматоза, как известно, является образование мономинеральных пород (Коржинский, 1953; Наковник, 1949). В нашем случае таким продуктом являются в общем-то мономинеральные трепеловидные породы.

С выходом вновь образованных пород в зону аэрации и поверхностной денудации формируется собственно "шляпа" сернокислотного выветривания. Трепеловидные породы подвергаются размыву и выщелачиванию. Менее устойчивые переходные глины эродируются интенсивней, при этом они подвергаются огипсованию за счет дельювия гипс-ангидритов гаурдакской свиты, расположенных гипсометрически выше. В застойно-увлажненных местах образуются гнезда ярозита и квасцов. Отмеченное касается главным образом юго-восточной части "шляпы". Вероятно имевшая здесь сера полностью окислилась.

В северо-западной части окисляется сероводород и сера поздних генераций (в основном до серной кислоты). В результате кислотность пород в этой части "шляпы" резко возрастает (pH < 1). В этих условиях отмечается характерный процесс дегидратации полупрозрачного пластинчатого гипса с образованием белого ангидрита.

## Минералогические особенности зоны окисления Гаурдакского месторождения

Зона окисления Гаурдакского месторождения характеризуется рядом особенностей.

1. Зона окисления отличается значительным содержанием в породах свободной серной кислоты, что является характерной чертой выветривания серы в пустынных условиях.

2. В зоне окисления повсеместно образуется ангидрит. Этот минерал формируется за счет обезвоживания гипса серной кислотой, образующейся при окислении серы. В окисленных рудах можно проследить все переходы от кристаллов гипса, едва затронутых процессом ангидритизации, до полных псевдоморфоз ангидрита по гипсу. Такие продукты естественного обезвоживания гипса многими исследователями принимались за полугидрат кальция, однако проведенные нами рентгеновские исследования показали, что все проанализированные образцы представлены ангидритом или смесью гипса (реликтового) и ангидрита.

3. Окисленные руды месторождения содержат галлуазит, образование которого связывают с действием на исходные минералы или породы сернистых растворов. Об этом свидетельствует тесная ассоциация галлуазита с алунином.

4. В зоне сернокислотного выветривания в заметных количествах содержатся выделения самородной серы. В ряде случаев морфология новообразованной серы существенно отличается от морфологии серы в рудной залежи. Сера обычно представлена порошокватой и волокнистой разностями. Ассоциирует она часто с ангидритом, образовавшимся в результате обезвоживания гипса.

5. В зоне окисления в рудах обнаружен в значительных количествах сульфат окисного железа — мелантерит. Небольшое содержание этого минерала ранее было отмечено только для Роздольского месторождения.

В условиях сернистой среды разлагаются карбонатные минералы и алюмосиликаты глин, геохимическая подвижность ряда элементов (щелочные металлы, железо, алюминий) становится весьма значительной. Последующее повышение pH растворов, вызванное нейтрализацией карбонатами, а также изменение их концентрации в результате разбавления инфильтрационными водами, способствовало выпадению из них ряда новообразований, охарактеризованных выше.

### Литература

- Беленицкая Г.А. Палеогеоморфологический и гидрогеологический критерий при изучении сероносности сульфатоносных толщ. — Докл. АН СССР, 1969, т. 184, №6.
- Гуревич М.С., Померанц Л.Б., Поспелов А.П. Биогидрохимическая аномалия Гаурдакского серного месторождения. — В кн.: Доклады отделений и комиссий Географ. об-ва СССР, вып. 2, 1967.
- Иванов М.В. Роль микробиологических процессов в генезисе месторождений самородной серы. М., "Наука", 1964.
- Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов. В кн.: Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., Изд-во АН СССР, 1953.

- Краткое методическое руководство по прогнозу месторождений самородной серы среди осадочных образований. Геол. ин-т. Казань, 1968.
- Лазарев И.С., Мамчур Г.П.  $C^{12}/C^{13}$  в карбонатах Гаурдакского месторождения серы. – Изв. АН ТуркмССР, серия физико-техн., хим. и геол. наук, 1969, №3.
- Лазарев И.С., Вдовиченко Г.М. Карст и субтерральные отложения на Гаурдакском месторождении серы. – Изв. высших учебн. завед., геол. и разв., 1970, №9.
- Лазарев И.С., Худайкулиев Х., Мясогутов А.И., Вдовиченко Г.М. Гаурдак-Кугитангский сероносный район. Ашхабад. Изд. Упр. геол. СМ ТуркмССР, 1971.
- Лазарев И.С. О процессах метасоматического серообразования в экзогенных условиях (на примере Гаурдакского месторождения Среднеазиатской сероносной провинции). – В кн.: Геохимия и минералогия серы. М., "Наука", 1972а.
- Лазарев И.С. Об условиях формирования серных залежей и стадиях минерализации на Гаурдакском месторождении. – Изв. АН СССР, серия геол., 1972б, №1.
- Наковник Н.И. Метасоматическое минералообразование и закон равных объемов. – Зап. Всесоюз. минерал. об-ва, т. 78, вып. 4, 1949.
- Седлецкий В.И. О некоторых экзотектонических явлениях, развитых в отложениях гаурдакской свиты. – Изв. АН ТуркмССР, серия физико-техн., хим. и геол. наук, 1965, №4.
- Юшкин Н.П. К геохимии процесса окисления самородной серы в условиях аридного климата. – В кн.: Проблемы прогноза, поисков и разведки горнохимического сырья СССР. М., "Недра", 1971.

## ВТОРИЧНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ И СУЛЬФАТНЫХ ПОРОД СЕРОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

Авторы реконструкций условий формирования эпигенетических месторождений серы справедливо отмечают большую роль подземных вод в образовании серы и парагенных ей минералов. Известны также попытки привлечения современной гидрогеохимической обстановки к объяснению генезиса месторождений серы. Например, И.С. Лазарев и другие (1971) указывают, что воды второй биогидрохимической зоны Гаурдакского месторождения серы являются аналогом рудообразующих растворов и участвуют в замещении сульфатных пород кальцитом и серой. Г.А. Беленицкая (1968) нашла на сегодняшнем Гаурдаке все те гидрохимические процессы, которые 700 тыс. лет назад сопровождали формирование месторождения.

Однако в последнее время появились данные, позволяющие усомниться в правомерности переноса в геологическое прошлое наблюдаемых в настоящее время процессов взаимодействия подземных вод и пород и указывающие на необходимость более строгой гидрохимической мотивировки подобного переноса.

В секторе трещинных коллекторов нефти и газа ВНИГРИ автором была разработана строгая и достаточно эффективная методика оценки способности подземных вод к эпигенетическому изменению вмещающих пород. Методика основана на физико-химических расчетах и применима к водам любых минерализаций и состава в температурном интервале от нуля до 100 °С. Опуская здесь описание самой методики, охарактеризуем некоторые результаты, полученные с ее помощью.

Девять скважин Гаурдакского месторождения серы были подвергнуты специальному гидрохимическому опробованию, а данные анализа проб пересчитаны по разработанной методике (табл.). Пробы имеют минерализацию от 70 до 180 г/л и характеризуют широкую полосу гидрохимического поля Гаурдака, охватывающую две нижние биогидрохимические зоны, выделенные на месторождении М.С. Гуревичем и др. (1967).

Коэффициенты насыщения этих вод некоторыми карбонатными и сульфатными солями приведены в таблице.

Коэффициенты и дефицит насыщения подземных вод некоторыми солями

Соли	Коэффициент насыщения ( $K_H$ )	Дефицит насыщения, г/л
$MgCO_3$	$4 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	0,03-0,20
$CaMg(CO_3)_2$	0,01-0,03	$2 \cdot 10^{-4} - 9 \cdot 10^{-4}$
$CaCO_3$	0,10-0,22	$3 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$
$CaSO_4$	0,99-1,04	-
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	1,03-1,13	-

Коэффициентом насыщения называется отношение фактической концентрации данной соли в воде к расчетному значению насыщающей концентрации<sup>1</sup>:

$$K_n = \frac{C_{\text{ф}}}{C_n}$$

Очевидно, коэффициент насыщения может быть меньше единицы – в этом случае вода не насыщена данной солью и способна растворять соответствующий минерал. Он может быть равен (или близок) единице – это означает, что вода насыщена солью и находится в равновесии с минералами. И, наконец, он может превосходить единицу, что означает перенасыщение воды солью и говорит о ее способности высаживать соответствующий минерал. Следует отметить, что значительное перенасыщение растворов, обычно достигаемое в лабораториях при соблюдении ряда условий, в природных подземных водах вряд ли возможно.

Приведенные в таблице изменения  $K_n$  по всем изученным пробам свидетельствуют о том, что подземные воды Гаурдакского месторождения серы ненасыщены по отношению к карбонатным минералам (фактические концентрации на один-три порядка ниже насыщающих). С другой стороны, все воды насыщены по отношению к гипсу и ангидриту (отличие  $K_n$  от 1 невелико и укладывается в 10%-ные пределы точности расчетов), причем насыщенность по гипсу несколько выше, чем по ангидриту.

Следовательно, современные воды гаурдакского водоносного горизонта агрессивны по отношению к карбонатным минералам и находятся в равновесии с сульфатными. В подобной ситуации реально протекание только двух эпигенетических процессов – растворения кальцита и замещения кальцита гипсом, т.е. совсем не тех процессов, которые должны были бы идти в переходной зоне по мнению упоминающихся исследователей. Оказалось также, что масштабы этих явлений чрезвычайно ограничены: для создания в  $1 \text{ м}^3$  известняка всего 0,1% пористости (или для замещения в  $1 \text{ м}^3$  известняка 0,1% кальцита гипсом) через него потребуется пропустить от 20 до 100 тыс.  $\text{м}^3$  воды рассмотренного состава.

Таким образом, наблюдаемые в гаурдакском водоносном горизонте обильные следы деятельности подземных вод правильнее не связывать с современной гидрохимической обстановкой, а рассматривать как реликты древних процессов, протекавших под влиянием вод иного состава,

---

<sup>1</sup> В статье не описана методика определения расчетного значения насыщающей концентрации. Вероятно, это значение в условиях сложных водных растворов расчетным путем определить практически невозможно, так как в сложных водных растворах растворимость тех или иных солей определяется совокупным и различным воздействием на растворяющую способность вод всех находящихся ионов. – Прим. ред.

методы реконструкции которого пока только разрабатываются. Вероятно, и на других месторождениях серы при постановке соответствующих исследований также будет установлено отмеченное на Гаурдаке резкое несоответствие современного эпигенеза эпигенезу древнему, сформировавшему серные залежи.

#### Литература

- Беленицкая Г.А. Современные гидрогеохимические процессы на Гаурдакском серном месторождении. — Докл. АН СССР, 1968, т. 183, № 6.
- Гуревич М.С., Померанц Л.Б., Поспелов А.П. Биогидрохимическая аномалия Гаурдакского серного месторождения. — В кн.: Доклады отделений и комиссий Географ. об-ва СССР, вып. 2, 1967.
- Лазарев И.С., Худайкулиев Х., Мясогутов А.И., Вдовиченко Г.М. Гаурдак-Кутитангский сероносный район. Ашхабад. Изд. Упр. геол. СМ Туркм ССР, 1971.

## ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ВУЛКАНАХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

(в связи с проблемой генезиса вулканогенной самородной серы)

В статье рассматриваются основные особенности накопления современных осадочных пород в районах вулканических построек, особое внимание уделяется сложным пачкам переслаивающихся вулканогенных и осадочных пород, погребенных в толщах четвертичных отложений. Эти пачки были названы автором кальдерными отложениями (Знаменский, 1969, 1971). С ними связаны основные залежи самородной серы Курильских островов.

В изолированных стратифицированных вулканических конусах накопление различных осадочных пород приурочено к нижним частям склонов и подножиям. Здесь локализуется переотложенный изверженный материал, слагающий вулканическую постройку. В составе осадочных фаций отмечаются делювиальные, аллювиальные и пролювиальные отложения, которые часто переотложены вновь в результате деятельности моря. Преобладает горизонтальное и полого наклонное залегание пород. Чисто вулканогенные прослои в составе осадков довольно редки.

В вулканических постройках линейно-гнездового типа наблюдается более сложная картина накопления осадочных пород, которая обусловлена относительно быстро сменяющейся морфологией рельефа (возникновение новых и разрушение старых вулканических форм). В результате этого происходит частая миграция источников сноса и аккумуляционных участков. Несмотря на значительные местные изменения рельефа морфология района вулканического хребта в общих чертах остается стабильной, т.е. областью сноса является центральная часть хребта, а областью аккумуляции — его подножия. На склонах хребта накопление значительных масс осадочного материала является временным и случайным. Так, образование лавопрудных озер ведет к накоплению озерных отложений на склоне, как это имеет место в бассейне р. Рыбной на о. Уруп. Здесь агломератовый поток вулкана Колокол, имеющий мощность до 100 м, подпрудил р. Рыбную, в результате чего в долине реки и ее притоков сформировались типичные озерные осадки — ленточные глины и слоистые мелкозернистые пески. В основании толщи озерных отложений в подчиненном количестве присутствует грубообломочный материал. Мощность озерной пачки составляет здесь первые десятки метров, а ее залегание и распространение целиком контролируются формой долины р. Рыбной.

Такая аккумуляция осадочного материала в склоновой части хребта кратковременна. Действительно, р. Рыбная вновь проложила себе русло озерных осадков и прорезала 100-метровую толщу агломератовых пород. В настоящее время происходит интенсивная эрозия озерных отложений и других пород склонового участка хребта.

Весьма своеобразная обстановка аккумуляции осадочных пород создается в кальдерных вулканах. Здесь относительно продолжительное время существует отрицательная замкнутая форма рельефа — кальдерная котловина, в которой накапливается эродированный материал ее внутренних бортов. В кальдере Головинна от подножья крутых внутренних склонов к центру кальдеры проявляется довольно отчетливое распределение обломочного материала по крупности. У бортов накапливается более крупный неслоистый глыбовый материал, в центральной части кальдеры канавами вскрываются породы псаммитовых и пелитовых фракций с отчетливо выраженной слоистостью, хотя в целом всюду в разрезах преобладают грубообломочные породы — более или менее слабо литифицированные конгломерато-брекчии с псефито-псаммитовым цементом. Залегание осадков на дне кальдеры субгоризонтальное, и лишь у внутренних бортов угол падения их внутрь кальдеры увеличивается до 20–30°.

Особенности развития кальдер обуславливают образование внутри них и вдоль уступов многочисленных стратовулканических конусов и экструзивных куполов. В связи с этим в составе внутрикальдерного комплекса пород существенное место занимают продукты внутрикальдерных извержений. Изменение морфологии рельефа вследствие продолжающегося вулканизма приводит к миграции отрицательных форм рельефа в пределах донной части кальдеры, а следовательно и мест аккумуляции осадочных пород.

В результате сочетания эрозии и вулканизма в кальдере образуются толщи переслаивающихся осадочных и вулканических пород, а также их промежуточных разновидностей. Изменение морфологии донной части кальдеры приводит к изменению залегания осадочных пород. У подножий куполов и конусов возникает наклонное залегание пород, что можно видеть, например, в кальдере Головинна и в кальдерах хребта Грозного в эрозионных врезках.

Образовавшиеся внутри кальдеры эффузивные конусы частично или полностью закрывают ранее возникшую кальдеру и связанные с ней внутрикальдерные отложения. Так, в Карымском вулкане на Камчатке крупная вулканотектоническая депрессия заполнена многочисленными и разнообразными конусами и куполами, прошедшими в более позднее время повторное кальдерообразование. На хребте Грозном (о. Итуруп) верхнечетвертичные кальдеры вулканов Тебенькова и Ивана Грозного в значительной мере закрыты продуктами голоценовых извержений. Кальдера Медвежья на о. Итуруп также заполнена более молодыми вулканосадочными толщами. Для кальдер Курильских островов и Камчатки очень характерно пространственное совмещение двух и более разновозрастных кальдер. На Камчатке И.В. Мелекесцевым, О.А. Брайцевой и другими (1969) отмечаются два этапа образования кальдер — среднеплейстоценовый и плейстоцен-голоценовый. Эти же возрастные этапы отмечаются и для кальдеры Заварицкого на о. Симушир, представляющей собой тройную кальдеру. Как правило, более древние кальдеры и вулканотектонические депрессии обладают большими размерами, достигая 10–15 км в диаметре, а более молодые верхнеплейстоценовые, хорошо сохранившиеся в рельефе, имеют размеры 3–6 км.

По данным М.И. Зубина, И.В. Мелекесцева и других (1969), все основные пункты выходов гидротерм на Камчатке с температурой выше 100°C приурочены к кальдерам и вулcano-тектоническим депрессиям. Интенсивная газо-гидротермальная деятельность происходит в большинстве кальдер Курильских островов: в кальдерах Головнина, Медвежьей, Тебенькова и др. Следствием газо-гидротермальной деятельности в кальдерах является широкое развитие гидротермально измененных пород. Особенно интенсивному изменению подвергаются легко проницаемые осадки донных частей кальдеры.

Таким образом, рассматривая связь четвертичного кальдерообразования и осадконакопления, можно отметить следующие: 1) кальдерные депрессии широко распространены на Курильских островах, они располагаются как изолированно, так и в пределах вулканических хребтов; 2) наблюдается пространственное наложение кальдер, причем более молодые кальдеры характеризуются меньшими размерами; 3) кальдерные депрессии являются относительно стабильными аккумуляторами осадочных пород, во всех остальных случаях значительные толщи осадочных пород в вулканическом районе Курильских островов могут накопиться только на периферии вулканических сооружений; 4) с кальдерами связана интенсивная поствулканическая деятельность, приводящая к гидротермальному изменению осадочных и вулканогенных внутрикальдерных отложений и накоплению серы в этих породах.

В стратиграфическом разрезе четвертичных вулканических хребтов — в среднеплейстоценовых отложениях (Знаменский, 1971) отмечается широкое распространение субгоризонтально залегающих осадочных пород, которые послойно чередуются с эффузивными породами. Мощность этих слоистых толщ в районе Заозерного месторождения серы на о. Парамушире составляет более 100 м, на месторождении Новом на о. Итуруп — более 200 м, в районе хр. Криштофовича на о. Уруп — около 100 м и более, на хр. Грозном (в бортах кратера Мачеха) — более 150 м. Рассматриваемая пачка чередующихся осадочных и вулканогенных пород прослежена по простираению на месторождении Новом на расстоянии более 5 км. На месторождении Заозерном вследствие сильной эрозии эти породы прослеживаются в виде отдельных эрозионных останцов, каждый из которых имеет площадь порядка нескольких десятков тысяч квадратных метров. На хр. Грозном видимая протяженность этих пород составляет около 1 км.

Сравнение среднеплейстоценовых толщ с современными внутрикальдерными отложениями по литологии, условиям залегания, составу и позволило автору считать, что среднеплейстоценовые вулканогенно-осадочные породы являются кальдерными отложениями (Знаменский, 1969, 1971). Наиболее изучены такие отложения на территории месторождения Нового, где они прослежены в обрывистых обнажениях вдоль бортов верхнечетвертичной кальдеры (кальдера вулкана Нового), а также в поисковых скважинах.

Нормальные осадочные породы в разрезе толщ составляют на различных участках от 35 до 70% (в среднем около 50%). Остальная часть разреза сложена андезитовыми лавами и туфами, которые так же,

как и осадочные породы, изменены и превращены в опалиты, кварциты и глинисто-опаловые породы. Эффузивные и осадочные породы содержат самородную серу.

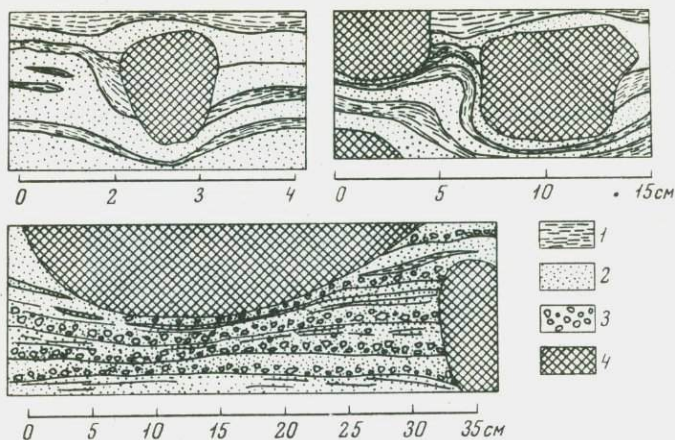
Среди осадочных пород резко преобладают грубообломочные разности, сцементированные песчано-гравийным материалом. Песчаные и гравийные частицы цементируются опалом, глинистыми минералами, смесью опала с тонкдисперсной серой, содержащими иногда примесь сажистых сульфидов железа. Размеры крупных обломков в грубообломочных породах достигают 0,5 м, в отдельных случаях 2 м. Края и углы крупных обломков обычно сглажены, а часть обломков представляет собой идеально окатанные валуны. По всем признакам эти грубообломочные породы можно отнести к конгломерато-брекчиям.

Состав обломочного материала в этих породах весьма разнообразен. На участках слабого осернения (например, в верховьях р. Новой) различаются неизменные эффузивные породы разнообразного облика, аргиллизированные и сульфидизированные по периферии, толщина измененного слоя колеблется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров; опалиты различного цвета и структуры, часто сохранившие хорошо выраженную реликтовую структуру эффузивных и осадочных пород; кварциты, в которых реликтовая структура исходных пород более или менее затупевана; местами встречаются обломки кварц-тридимитовых, редко чисто тридимитовых пород. Часть измененных обломков содержит самородную серу от нескольких процентов до 50-60%. В псаммитовой части кроме различных пород встречаются обломки измененных, реже неизменных минералов. Цементом в основном являются глинистые минералы и опал, обычно содержащие тонкозернистый пирит — мельниквит, а местами и чистую серу.

Минеральный состав обломков осадочных пород на участках интенсивного осернения (например участок Западный на месторождении Новом) отличается значительно большей однородностью. Среди обломков здесь широко развиты опалиты и кварциты с разнообразным обликом и структурой, часть их содержит примесь алуниита. Реликтовые структуры обломков принадлежат эффузивным, реже осадочным породам. Серы присутствует и в обломках, и в цементе. Изредка встречаются и обломки плотных эффузивных пород, зонально измененных по периферии. Цементом здесь является смесь опала с тонкодисперсной серой.

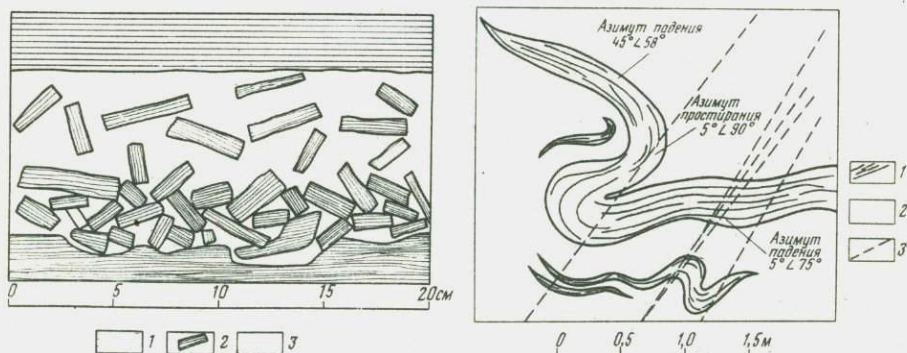
О водно-осадочном происхождении рассматриваемых пород свидетельствуют первичные текстуры вдавливания и облекания обломков (фиг. 1). Такие текстуры формируются в момент накопления осадков, когда они еще не литифицированы. Не менее характерны и текстуры, образовавшиеся в результате "встрягивания" слабо литифицированных илов, возможно, в моменты оголений при землетрясениях (фиг. 2). О слабой литифицированности пород и их "пластичном" состоянии в момент смятия свидетельствуют причудливые крутые складки в зонах внедрения субинтрузивных андезитов, рвущих вулканогенно-осадочную толщу (фиг. 3).

Тонкообломочные породы, обладающие псефитовой, псаммитовой и меньшей размерностью обломков, обычно проявляют тонкую ритмичную слоистость с ярко выраженной сортировкой обломков по крупности внутри каждого слоя и с четкими плоскостями напластования (фиг. 4).



Фиг. 1. Первичные нарушения слоистости в осадочных породах кальдерных отложений месторождения Нового

1 - опал с примесью пелитовых и алевритовых частиц; 2 - песчаник; 3 - гравелит; 4 - обломки измененных андезитов



Фиг. 2. Нарушение слоистости в кальдерных отложениях месторождения Нового

1 - тонкослоистый кварцит; 2 - обломки тонкослоистого кварцита; 3 - массивный кварцит

Фиг. 3. Микроскладчатость в кальдерных отложениях месторождения Нового (схематическая зарисовка поверхности обнажения)

1 - слоистый песчаник; 2 - гравелит с примесью крупных обломков; 3 - трещины



Фиг. 4. Слоистая осадочная руда месторождения Нового. Видны микросбросы, стрелками показаны секущие прожилки третьей генерации серы, 0,7 нат.вел.

Не менее характерна косая слоистость. В отдельных случаях наблюдаются крутопадающие нептунические жилки мощностью до 5–10 см. Они представлены тонкообломочным песчаником, иногда субгоризонтально слоистым, с вогнутыми вниз плоскостями напластования, высплняющими открытые трещинки и полости в разнообразных породах, преимущественно в измененных и осерненных лавах. Состав песчано-гравийного материала таких жилок в точности соответствует составу и облику слоя, лежащего выше вмещающей жилку породы. Все эти признаки свидетельствуют о широком участии в накоплении вулканогенно-осадочных кальдерных отложений водной среды.

На основании распределения серы в осерненных осадочных породах с учетом перечисленных признаков осадочных пород в рудах можно су-

дять об особенностях их генезиса. В относительно бедных рудах сера находится обычно либо только в обломках, либо только в цементе. Для богатых серных руд с содержанием серы 30–50% и выше характерно присутствие серы и в обломках, и в цементе.

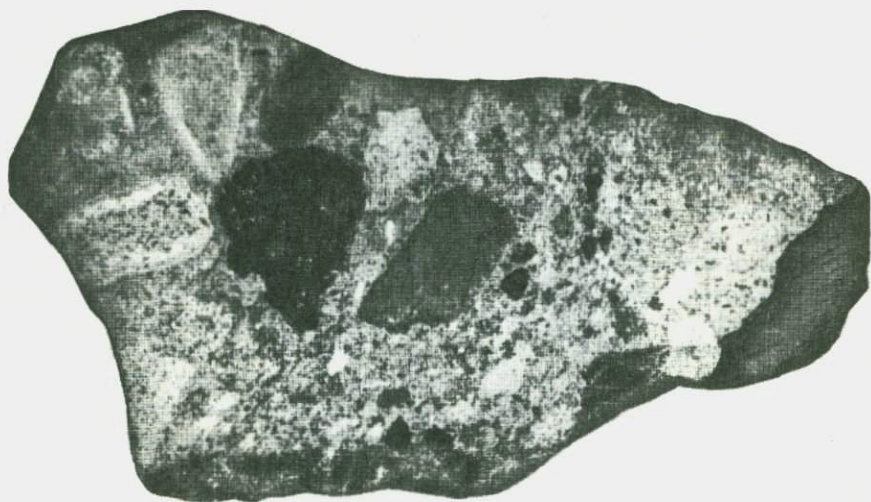
Существенные концентрации серы в обломках пород зафиксированы в современных и верхнечетвертичных рыхлых конгломерато-брекчиях конусов выноса в кальдере Криштофовича и у подножия хр. Криштофовича. Форма обломков разнообразных серосодержащих пород колеблется от идеально окатанных галек до слегка сглаженных угловатых обломков. В таких обломках, особенно в тех из них, где имеется тонкодисперсная самородная сера, по периферии отмечается обычно кромка толщиной в несколько миллиметров, в которой тонкодисперсная сера выщелочена (окислена), а крупнозернистая сохранилась в виде овальных полупрозрачных зерен, которые только частично по краям претерпели растворение. В центральной части осерненных обломков сохранились и тонкодисперсная, и крупнозернистая вкрапленная сера. Граница выщелоченной и неокисленной частей всегда очень резкая и обычно повторяет форму поверхности обломка.

В серосодержащих обломках, в которых в том или ином количестве находится сажистый пирит-мельниквит, внешняя каемка окисления имеет большую толщину (до нескольких сантиметров), причем в краевой части таких обломков наблюдается бурая каемка, образовавшаяся за счет концентрации в ней гидроокислов железа. В рыхлых конгломерато-брекчиях конусов выноса вокруг сильно пиритизированных глыб наблюдаются широкие ореолы лимонитизации, а дренирующаяся через эти породы вода имеет сильно кислую реакцию.

Следовательно, сернорудные концентрации образовывались одновременно с накоплением толщи рыхлых осадочных пород. Аналогами подобных пород являются отдельные литифицированные горизонты осадочных пород пестрого состава в верховьях правого истока р. Новой. Эти породы входят в состав среднеплейстоценовых кальдерных отложений.

Современное накопление серы в тонкообломочном цементе осадочных пород отмечается в кратерных озерах. Например, в кальдере Головнина в оз. Кипящем, у его крутого борта, сложенного экструзивными дацитами, накапливаются серогосные донные илы, содержащие значительную примесь грубообломочного материала осыпей. Эти обломки подвергаются с поверхности гидротермальному изменению, но серы обычно не содержат. Такие обломки фиксируются и в погребенных кальдерных отложениях, даже в участках обильного осернения. В обнажениях северо-восточного участка месторождения Нового в кальдерных отложениях имеются линзы и прослойки тонкообломочных пород со слоистым распределением серы, что свидетельствует о ее синхронном накоплении (см. фиг. 4).

Наиболее богатые серные руды содержат серу и в обломках, и в цементе. В центральной части кальдеры Криштофовича среди современных грубообломочных пород отмечается случай образования подобной концентрации серы. Эти грубообломочные отложения со значительным количеством обломков серных руд в верховьях центрального истока р. Водопадной осернены вторично. В пределах участка вторичного осернения



Фиг. 5. Крупнообломочная серная руда месторождения Нового, 0,7 нат. вел.

все обломки претерпели гидротермальное изменение и превращены в опалиты, содержащие самородную серу. Цементом пород является тонкозернистая кристаллическая сера в смеси с опалом. В составе образовавшейся серной руды имеется сера двух генераций — сера I, входящая в состав переотложенных осерненных обломков, и сера II, образованная в поверхностных условиях в момент гидротермального изменения части горизонта рыхлых грубообломочных осадочных пород.

Подобные богатые руды (фиг. 5) преимущественно грубообломочного строения фиксируются в среднечетвертичных кальдерных отложениях месторождения Нового (Западный участок), в хр. Криштофовича, на отдельных участках месторождения Заозерного. Для них характерны следующие черты: разнообразный состав обломочного материала; хорошая окатанность значительной части обломков; наличие слоистости и следов ее смятия в цементе, а также каемок выщелачивания дисперсной серы во многих окатанных обломках; высокие содержания серы и наличие ее и в обломках, и в цементе.

Макроскопические наблюдения и микроскопические исследования позволяют различать в обломочных серных рудах кальдерных отложений серу трех разновозрастных генераций. Сера I входит в состав осерненных обломков преимущественно опалового состава, обладающих реликтовыми структурами разнообразных эффузивных и осадочных пород. К критериям ее более раннего образования относятся: наличие каемок окисления серы по периферии обломков; резкие границы окатанных серо-содержащих обломков с осерненным цементом; различный облик серы цемента и обломков — в обломках сера часто замещает первичные минералы, а в цементе она обычно выполняет межзерновое пространство

между обломочными частицами; существенно отличный изотопный состав серы обломков и цемента. Например, в обломке руды из скв. 11 месторождения Нового  $\sigma S^{34}$  самородной серы составляет 21,10/00, тогда как цементирующая обломки сера характеризуется величиной  $\sigma S^{34} - 10,90/00$  (Виноградов, Знаменский, 1971). Все это позволяет говорить о разновременном образовании серы в описанных обломках и в цементе.

Сера II составляет основную часть серы в осадочных серных рудах. Она находится в цементе и замещает часть обломков. Синхронное с осадконакоплением образование серы II доказывается слоистым распределением, согласным со слоистостью породы, и нахождением ее в межзерновом пространстве. Сера III является секущей по отношению ко всей остальной части ранее образованной серы и большинству минералов руды. Эта поздняя сера образует систему секущих прожилков различного направления, выполняющих трещинки различного генезиса (см. фиг. 4), в том числе и тонкие трещины с отчетливо выраженными зернами скольжения.

Таким образом, на основании изложенного материала по осадочным сероносным породам крупнейших серных месторождений Курильских островов можно сделать следующие генетические выводы. Основная масса серы накапливалась субсинхронно формированию рудомещающих толщ в поверхностных условиях. Сера отлагалась как в виде химических осадков (в цементирующем материале обломочных пород), так и в виде ранее осерненных обломков. Присутствие среди продуктивной толщи прослоев осерненных пород с реликтовой структурой лав и туфов несколько не опровергает основного вывода, так как вполне допустимо изменение и осернение лав и туфов в поверхностных условиях, что наблюдается в современных сольфатарных полях. Наличие подстилающих и перекрывающих сероносных осадков вокруг линз и прослоев эффузивных пород подтверждает этот вывод.

#### Литература

- Виноградов В.И., Знаменский В.С. Изотопный состав и генезис серы месторождения Новое (о. Итуруп, Курильские острова). - В кн.: Геохимия и минералогия серы. М., "Наука", 1971.
- Знаменский В.С. Некоторые закономерности локализации самородной серы в кальдерных вулканах Курильских островов. В кн.: Вулканизм, гидротермы и глубины Земли. Петропавловск-Камчатский, Дальневосточное книжное изд-во, 1969.
- Знаменский В.С. Вулканогенные серные руды Курильских островов (геология, петрография, условия образования). - В кн.: Геохимия и минералогия серы. М., "Наука", 1971.
- Зубин М.И., Мелекесцев И.В., Таракановский А.А., Эрлих Э.Н. Четвертичные кальдеры Камчатки. - В кн.: Вулканизм, гидротермы и глубины Земли. Петропавловск-Камчатский, Дальневосточное книжное изд-во, 1969.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д., Огородов Н.В., Кожемякина Н.Н., Егорова И.А., Липкина Е.Г. Возраст вулканов Курило-Камчатской зоны. - В кн.: Вулканизм, гидротермы и глубины Земли. Петропавловск-Камчатский, Дальневосточное книжное изд-во, 1969.

## СТРУКТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВУЛКАНОГЕННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ СЕРЫ ПО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ И ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Малетойваямское месторождение самородной серы, расположенное в северной части Северо-Камчатского сероносного района, является типичным и наиболее крупным из известных в СССР вулканогенных гидротермально-метасоматических залежей самородной серы, что позволяет считать его эталоном при разработке поисковых критериев на этот вид полезного ископаемого на севере Камчатки.

Авторы, изучая район месторождения в 1964-1971 гг., уделяли особое внимание литолого-структурным факторам локализации серного оруденения и закономерностям размещения залежей серы в общей структуре региона.

### Региональные условия размещения месторождений и проявлений серы

Гидротермально-метасоматические залежи серы размещены во внутренних вулканических дугах Тихоокеанского вулканического пояса (Власов, Петраченко, 1965; Власов, 1971). В региональном плане их структурно-тектоническое положение вполне определено: они тяготеют к глубинным разломам, являющихся очагами мощных магматических процессов на протяжении всего мезо-кайнозойского времени. В описываемом районе эта зона носит название Вывенской зоны глубинных разломов.

В пределах вулканических дуг, трассированных глубинными разломами, месторождения серы распределены неравномерно. Вместе с многочисленными мелкими проявлениями серной минерализации они концентрируются группами, в рудных узлах, где сосредоточены гидротермально измененные породы - вторичные кварциты и пропилиты. В Северо-Камчатском районе выделяется два таких узла: Лесновско-Красногорский, расположенный на северном окончании Срединного хребта, и Энынгваямский - в юго-западных отрогах Корякского нагорья. Характерно, что рудные узлы тяготеют к участкам проявления резко дифференцированных движений земной коры в кайнозойское время - к сочленениям выступов мелового фундамента с относительно молодыми прогибами: Парапольским и Олоторским, которые имеют тенденцию к опусканию и в настоящее время. Именно на этих участках проявления вулканизма отмечены в наиболее широком временном интервале - от мелового до четвертичного периода.

Потенциально сероносны те отрезки глубинных разломов, где тектонические движения имели наибольшую амплитуду и магматические процессы возникали наиболее часто. Аэромагнитными и гравиметрическими

исследованиями на этих участках установлены крупные положительные аномалии  $\Delta T$  и  $\Delta Z$ , свидетельствующие о значительном возрастании средней плотности и магнитности пород в зоне глубинного разлома. Геологические исследования показали наличие здесь фрагментарных выходов интрузий гранитоидного ряда и большого количества вулканических жерл, экструзий, некков и даек, комагматичных мощным толщам вулканических пород андезитового состава.

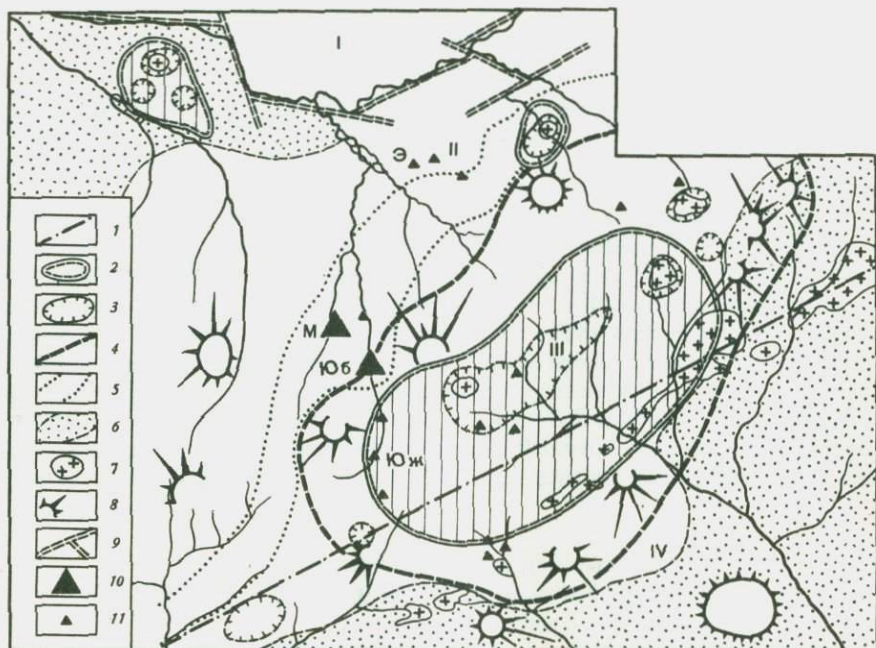
В рудных узлах проявления и месторождения серы концентрируются в определенных структурных элементах — в вулканотектонических сводовых поднятиях, образованных воздымающим действием магматических масс на фоне опусканий в полосе заложения крыльев прогиба. В частности, Энынгваямский рудный узел состоит из трех тесно связанных между собой сводов: Сеэрваямского, Малетойваямского и Ветроваямского. Условия локализации серных залежей рассматриваются нами на примере Малетойваямского вулканотектонического свода, в пределах которого расположен крупный массив гидротермально измененных пород — Малетойваямское рудное поле.

### Основные черты геологического строения и тектонического развития Малетойваямского рудного поля

По особенностям строения и тектонических движений здесь, как и на всей территории Энынгваямского рудного узла, выделяются четыре структурно-фациальных зоны (фиг. 1). В северной части в зоне устойчивых поднятий развиты меловые породы Ветвейского выступа, на которых местами залегают лавовые толщи неогена (велолныкская и корфовская свиты). Гидротермальные процессы, по данным А.И. Позднева и С.П. Скуратовского, проявлены здесь очень слабо, главным образом в виде каолинизации и окварцевания вблизи разрывных нарушений.

Через сложную систему сбросов Ветвейская зона на юге сочленяется с Энынгваямской грабен-синклиналью, образованной в результате опускания сопредельных площадей в ходе формирования Олюторского прогиба. В настоящее время принимается, что здесь на опущенных блоках меловых пород также залегают вулканогенные, вулканогенно-осадочные и осадочные породы неогена. Находки эоценовой фауны в осадочных породах на южном крыле структуры в верховьях ручья Кованейваям свидетельствуют о наличии в разрезе палеогеновых пород и, следовательно, о заложении Энынгваямской грабен-синклинали одновременно с Олюторским прогибом. При этом ее развитие шло параллельно с развитием и затуханием неогенового вулканизма. Вдоль ограничивающих грабен-синклиналь сбросов широко развиты вторичные кварциты (главным образом монокварциты и моноопалиты) и пропилиты, в которых широко распространена сульфидная минерализация.

Породы, слагающие грабен-синклиналь, к югу фациально переходят в вулканогенную толщу пород Вывенской зоны разломов, развитых в апикальной части сводового поднятия. Глубинное строение этой структуры не изучено. На основе геофизических данных можно заключить, что сво-



Фиг. 1. Геолого-структурная схема Малотойваямского рудного поля

1 - осевая линия Вывенской зоны глубинного разлома; 2 - граница аномалий силы тяжести; 3 - границы положительных аномалий  $\Delta T$ ; 4 - границы вулканотектонического свода; 5 - зона отрицательных аномалий; 6 - площади развития морских осадочных отложений неогена; 7 - выходы интрузивных пород; 8 - вулканические жерла и экструзии; 9 - сбросы; 10 - месторождения серы и участки рудного поля: М - Малотойваямское, Юб - Юбилейное, Юж - Южный, Э - Энынгваямский; 11 - мелкие проявления серной минерализации. Основные структурные элементы: I - Ветвейский выступ, II - Энынгваямская грабен-синклиналь, III - Малотойваямский вулканотектонический свод, IV - Олюторский прогиб

им северным крылом свод перекрывает породы мела или палеогена, в осевой части породы свода опираются на интрузивный массив, а на южном крыле перекрывают палеогеновую терригенную толщу и фациально переходят в неогеновые осадочные породы, выполняющие Олюторский прогиб.

В пределах Малотойваямского свода развиты все фации вторичных кварцитов (от корунд-диаспор-мусковитовой до серной) и среднетемпературные фации пропилитов (эпидот-карбонат-хлоритовые).

Четвертой (южной) структурно-фациальной зоной рудного узла является Олюторский прогиб, выполненный мощной (более 1 км) толщей морских терригенных пород палеогена и неогена. Гидротермальные процес-

сы в этой зоне проявлены локально вблизи глубинного разлома, где в экзоконтакте интрузий отмечаются высокоглиноземистые вторичные кварциты и интенсивная аргиллизация вулканогенного материала осадочных пород.

Характер тектонических движений, происходивших на площади Малетойваямского рудного поля, сохранялся в течение всего периода его формирования, в том числе и в четвертичное время. Это следует из анализа геологических разрезов и данных морфометрии и геоморфологии речных долин. Так, в зонах депрессий, где отмечается накопление осадков от палеогена до настоящего времени, речные долины 3, 4 и 5-го порядков образованы по созданному до них структурно-тектоническому плану (постермальные долины, по В.П. Философову). Они практически лишены надпойменных террас и сильно меандрируют в заболоченных днищах, несмотря на общее поднятие региона в четвертичном периоде. Напротив, в зонах поднятий, особенно с абсолютно положительным направлением движений (Ветвейский выступ), поверхностные водотоки имеют эрозионные сильно врезанные V-образные долины с двумя-тремя уровнями надпойменных террас.

Таким образом, в период формирования вторичных кварцитов и серных месторождений общий структурный план Малетойваямского рудного поля был, по-видимому, аналогичен наблюдаемому в настоящее время.

### Характеристика эндогенной минерализации

На территории Малетойваямского рудного поля происходили мощные поствулканические гидротермальные процессы, приведшие к формированию крупного (площадью около 100 км<sup>2</sup>) массива метасоматических пород весьма пестрого состава. Здесь выделяются разнообразные фации пропилитов, аргиллизированных пород и вторичных кварцитов, характеризующиеся различием минерального и химического состава в зависимости от физико-химических условий минералообразования. В этих породах отмечаются проявления меди, ртути, мышьяка, титана. Серная минерализация местами наложена на высокотемпературные метасоматиты, а в мезотермальной зоне образует крупные метасоматические залежи (Центральный и Юбилейный участки Малетойваямского месторождения). Вместе с серой здесь широко распространены также сульфиды железа и алунит.

Вмещающие серу породы месторождения имеют четкую метасоматическую зональность. Всего здесь выделяется семь фаций гидротермально измененных пород: 1) пропилит-хлорит-карбонатная; 2) монтмориллонит-каолининовая; 3) каолинит-кремнистая; 4) каолинит-кварцевая; 5) алунит-кварцевая; 6) серно-кварцевая; 7) монокварцевая.

Все минеральные ассоциации, имеющие постепенные взаимные переходы, образованы в единую стадию рудогенеза.

## Структурные условия локализации месторождений серы

Месторождения серы в пределах рудного поля располагаются преимущественно в окраинной части массива измененных пород в пределах сравнительно узкой полосы, концентрически огибающей апикальную часть вулканотектонического свода. Как показали морфологические построения, они тяготеют к зонам перехода участков с относительным поднятием, характеризующимся большой мощностью активного слоя, к депрессионным котловинам и опущенным блокам. Здесь отмечается также полоса отрицательных аномалий  $\Delta Z$  и  $\Delta T$  (см. фиг. 1). Геоморфологические исследования показали, что переходная тектоническая зона неоднородна по строению. В ней отчетливо устанавливается блоковая структура со сложным чередованием поднятых и опущенных участков на фоне общего относительного погружения. Выходы вторичных кварцитов с проявлениями серной минерализации приурочены к мелким сводовым и блоковым поднятиям типа горст-антиклиналей с амплитудой до 60 м (фиг. 2).

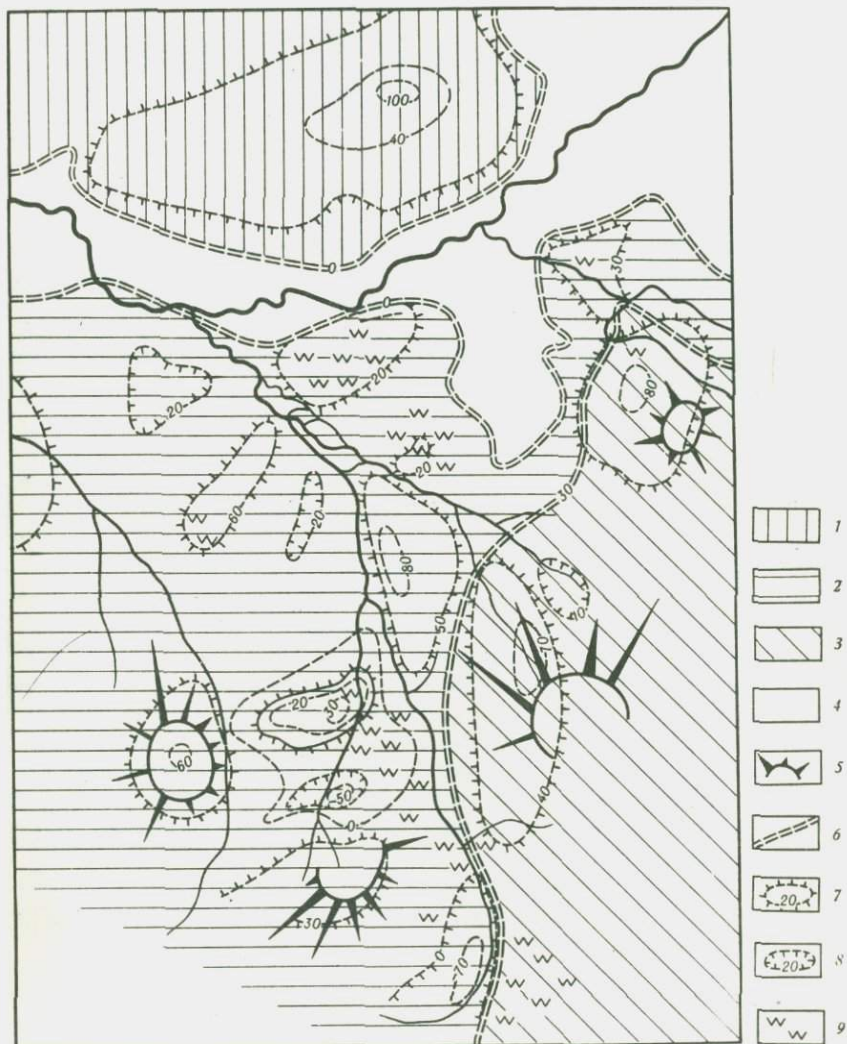
Такие структуры были детально изучены на Центральном, Юбилейном и Энингвьямском участках рудного поля методами магнитометрии, радиометрии, сейсмопрофилирования, геоморфологии, дешифрирования и литологического анализа разрезов. Исследования показали, что горст-антиклинали представляют собой длительно развивающиеся ядерно-купольные структуры, в центре которых находится наиболее монолитный блок пород, облекаемый со всех сторон или частично породами, захваченными процессом опускания сопредельных участков территории.

Эти структуры являются, очевидно, следствием проявления локальной неоднородности жесткого основания вулканогенно-осадочной толщи — массивных андезитобазальтов, вскрытых на Центральном участке скв. 16-с на глубине 330 м, что подтверждается данными сейсмопрофилирования.

Характерно, что мощность отдельных литологических разностей пород в разрезе, особенно андезитов, сильно меняется в направлении от апикали к крыльям описываемых поднятий. Эта особенность выражена также в изменении уровня магнитного поля — от меньшего в сводовой части к большему на крыльях. Аналогичная закономерность отмечается и в мощности *элювиально-делювиальных* четвертичных образований. В частности, древние речные долины огибали апикальные части поднятий.

Изложенный материал свидетельствует, что развитие рудолокализирующих поднятий происходило в течение всего периода формирования толщи исходных пород и в ходе ее гидротермально-метасоматического преобразования. По-видимому, именно такие структуры обеспечивали необходимую для рудоотложения постоянную термодинамическую связь области формирования рудоносных растворов с земной поверхностью.

Вторичные кварциты образованы в центральных частях локальных поднятий и на их крыльях в моноклинально залегающих породах. Выходы центральных фаций гидротермально-измененных пород (монокварциты, опалиты) приурочены к сводовым частям структур, имеющим наибольшую тектоническую трещиноватость. Алунитовая и серная фации тяготеют к структурным и литологическим ловушкам типа экранированных пластов, систем слепых трещин, линзам туфов среди лавовых потоков и т.п.



Фиг. 2. Тектоническая схема Малотуйвайамского рудного узла по данным геоморфологического анализа

1 - участки устойчивых поднятий; 2 - участки относительных опусканий; 3 - участки относительных поднятий; 4 - участки устойчивых опусканий; 5 - вулканические жерла и экструзии; 6 - границы основных структурных элементов; 7 - блоки относительных поднятий; 8 - блоки относительных опусканий; 9 - массивы сероносных вторичных кварцитов

Таким образом, структурные условия локализации серного оруденения на Малетойваймском рудном поле определяются дорудной тектоникой, литологической неоднородностью пород и особенностями длительной тектонической эволюции определенных структурных зон.

#### Литература

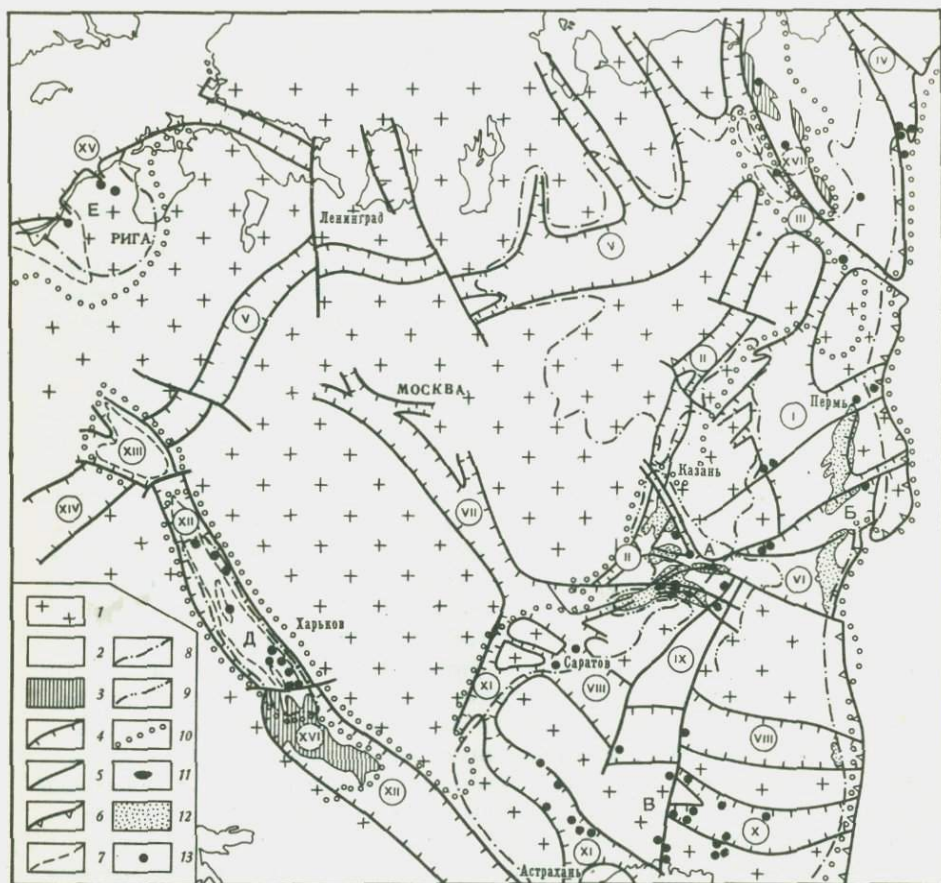
- Власов Г.М. Закономерности пространственного размещения и возраст вулканических серных месторождений. — В кн.: Вулканические серные месторождения и некоторые проблемы гидротермального рудообразования. М., "Наука", 1971.
- Власов Г.М., Петраченко Е.Д. Метасоматические месторождения серы Камчатки и Курильских островов. — Сов. геол., 1965, № 5.

## ТЕКТОНИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ САМОРОДНОЙ СЕРЫ ПЛАТФОРМЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ

Анализ размещения галогенных формаций, к которым приурочены месторождения серы, показал их тесную связь с мобильными зонами земной коры — синеклизами, передовыми прогибами и перикратонными впадинами (Соколов, 1958, 1969; Иванов, Левичкий, 1960; Корневский, Воронова, 1966). Несколько позднее Р.Н.Валеев (1971) обратил внимание на роль рифтовых структур (авлакогенов) в размещении галогенных формаций. Даже в поздние периоды развития синеклиз галогенные формации, как правило, размещаются в активизированных мобильных зонах в границах погребенных авлакогенов. Наложение Средневожского, Предуральского, Прикаспийского, Днепровско-Донецкого и других сероносных бассейнов на тектонические схемы рифтовых структур, установленных по данным бурения и геофизических работ, свидетельствует о том, что Средневожский бассейн тяготеет к Сергиевскому, Казанско-Кировскому авлакогенам и прилегающим краевым частям Жигулевского, Татарского и Токмовского сводов.

Предуральский бассейн соответственно располагается в зоне Камско-Бельского авлакогена и его сочленения с Сергиевско-Абдуллинским авлакогеном, Предуральским прогибом и т.д. (фиг. 1). Интенсивность серного оруднения резко снижается от авлакогена и прилегающих к нему краевых частей сводов к их внутренним зонам, несмотря на то, что периферические карбонатно-сульфатные фациальные зоны галогенной формации, казалось бы, благоприятны для сероаккумуляции и нередко захватывают огромные площади. Размещение сероносных бассейнов зависит от обязательного присутствия трех основных факторов — развития галогенных формаций, наличия углеводородов и существования в основании разреза авлакогена или грабена.

Статистическое изучение пространственного распределения дизъюнктивных нарушений фундамента и осадочного чехла по отношению к различным генетическим типам структур показало, что их плотность крайне неравномерна. Авлакогены как области глубокой перестройки земной коры, пронизанные системами глубинных разломов, характеризуются повышенной плотностью нарушений: до 15–17 разломов на 100 км анализируемого профиля. Еще более повышается плотность нарушений при переходе в зоны краевых сочленений авлакогена и сводов, где она достигает 17–20 нарушений на 100 км. Внутренние зоны массивов нарушены значительно слабее, число разломов здесь обычно не превышает 5–7 на 100 км, т.е. в 2–2,5 раза ниже средней плотности разломов в авлакогенах (Валеев, 1968). Если принять во внимание процесс интенсивного формирования инверсионных и приразломных поднятий в конечную фазу развития авлакогена — в герцинский и альпийский циклы тектогенеза, то рифтовые структуры, видимо, следует рассматривать



Фиг. 1. Схема размещения сероносных бассейнов в связи с рифтовыми структурами фундамента Русской платформы

1 - щиты и своды; 2 - грабены и авлакогены; 3 - складчатые сооружения; 4 - глубинные разломы, контролирующие авлакогены; 5 - глубинные сдвиги; 6 - западный склон Уральского орогена; 7-9 - границы распространения сульфатно-галогенных формаций: 7 - девонской, 8 - нижнепермской, 9 - верхнепермской; 10 - границы региональных областей нефтегазоаккумуляции; 11 - месторождения самородной серы; 12 - зоны интенсивных серопроявлений; 13 - серопроявления; I-XV - авлакогены и грабены: I - Камско-Бельский, II - Вятский, III - Предтима́нский, IV - Нарья́н-Ма́рский, V - Среднеру́сский, VI - Серге́евско-Абду́ллинский, VII - Пачелмский; VIII - Пугачевский, IX - Бузулу́кский, X - Инде́рский, XI - Доно-Ме́дведи́цкий; XII - Большо́й До́нбасс, XIII - Припя́тский, XIV - Южно-Украи́нский, XV - Ботни́ческо-Ба́лтийский; складчатые сооружения: XVI - До́нецкий кра́й, XVII - Тима́н; сероносные бассейны: А - Серге́евско-Абду́ллинский, Б - Пачелмский, В - Прикаспи́йский, Г - Тима́нско-Пе́чорский, Д - Днепровско-До́нецкий, Е - Приба́лтийский

как наиболее проницаемые зоны земной коры и осадочного чехла платформ.

Таким образом, перспективны для серообразования, как правило, авлакогены или отдельные зоны синеклиз передовых прогибов и перикратонных впадин, в основании которых выделяются погребенные рифейские авлакогены, активизированные в конце герцинского и в альпийский циклы тектогенеза.

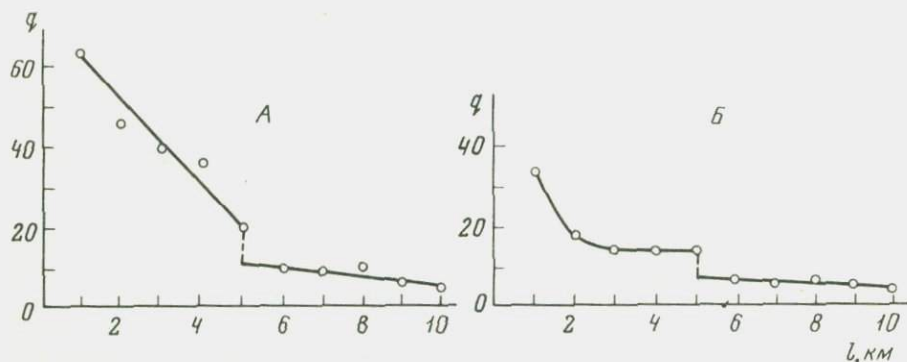
Наблюдается асимметричное расположение сероносных бассейнов и их тяготение к одному из бортов рифтовых структур. Так, Средневожский бассейн в основном приурочен к южному борту Сергиевско-Абдуллинского авлакогена, а Предуральский бассейн размещается вдоль восточного борта Камско-Бельского авлакогена. Это объясняется неравномерным развитием бортов авлакогенов с одновременным возрождением контролирующих и глубинных разломов.

Связь сероносных бассейнов с авлакогенами следует считать важнейшим поисковым критерием при региональной прогнозной оценке платформ на серу. Тем более, что в настоящее время разработаны методы выделения рифтовых структур без данных бурения по результатам анализа магнитного поля (Валеев, 1970).

Распределение месторождений серы и интенсивных серопроявлений внутри сероносного бассейна в свою очередь далеко неравномерно и связано с зонами тектонических узлов, образовавшихся при пересечении разломов различных направлений, и с разломами определенного типа. Обнаруживается также связь со сдвиговыми нарушениями. Это четко видно на примере размещения средневожских месторождений серы. Месторождения Серная Гора, Дойки, Дубовское, Алексеевское, Сырейско-Каменнодольское, Водинское располагаются вдоль Жигулевского сдвига, Ключевское — в районе Сергиевского сдвига и его оперения, Сюкеевское — вблизи Камского сдвига. Установленную связь серного оруденения с тектоническими узлами и сдвигами следует считать одним из важных поисковых критериев.

Для выявления причинной связи серопроявлений и месторождений серы с разломами был использован метод корреляционно-статистического анализа (фиг. 2). По 253 точкам, со всех известных месторождений была исследована зависимость количества установленных серопроявлений ( $q$ ) от расстояний до ближайших разломов ( $l$ ). Точки распределяются вблизи кривой второго порядка типа гиперболы. Оказалось, что максимальное количество точек с серопроявлениями отмечается в 5-километровой приразломной зоне, где сосредоточены все месторождения и более 80% серопроявлений. За этой полосой происходит разрыв функции и резкое снижение находок серы (см. фиг. 2).

Ввиду тесной парагенетической связи серопроявлений с нефте- и битумопроявлениями была исследована подобная зависимость для битумопроявлений и также установлена зависимость гиперболического типа с разрывом функции за 5-километровой зоной, где сосредоточено 72,3% установленных битумопроявлений. Эта зона была названа критической приразломной зоной, которую следует считать одним из важных поисковых критериев при среднемасштабных прогнозах.



Фиг. 2. Графики зависимости количества (q) серопроявлений (А) и битумпроявлений (Б) от расстояний до разломов (l)

Что представляет собой установленная приразломная зона? Методом картирования тектонической трещиноватости по геоморфологическим данным (с учетом линейных эрозионных стоков, спрямленных участков речных долин, линейных положительных форм рельефа, естественных границ растительности и т.п.) был изучен ряд площадей Средневожского сероносного бассейна (изучались и приразломные, и тыловые участки). По среднemasштабным топографическим картам методом квадратов была подсчитана плотность тектонической трещиноватости ( $\text{км}/\text{км}^2$ ) и построена карта равных плотностей в изолиниях. Оказалось, что распределение трещин крайне неравномерно, выделяются участки повышенной плотности, достигающие  $2-2,5 \text{ км}/\text{км}^2$ . Средняя плотность нарушений в приразломной зоне достигает  $1,2 \text{ км}/\text{км}^2$ , за пределами зоны она снижается в  $2-2,5$  раза и составляет  $0,4-0,5 \text{ км}/\text{км}^2$ .

Все месторождения Средневожского бассейна совпадают с выделенными максимумами повышенной плотности нарушений ( $1,75 - 2 \text{ км}/\text{км}^2$ , см. фиг. 2).

В пределах сероносного бассейна обнаружен еще ряд участков с повышенной плотностью нарушений, причем эти участки часто значительно больших размеров, чем размеры месторождений. По положению в единой структурной зоне Жигулевского вала и наличию в разрезе сульфатно-карбонатных пород эти участки рассматриваются нами как высокоперспективные для поисков самородной серы.

Таким образом, анализ размещения зон серного оруденения позволил выделить ряд тектонических нарушений, сужающих объекты прогнозных оценок и поисков. Это авлакогены, тектонические узлы, разломы, преимущественно сдвиги, приразломная критическая зона, участки максимальной плотности тектонической трещиноватости.

Выделение этих нарушений (служащих тектоническими критериями) в комплексе с ранее установленными А.С. Соколовым (1958, 1969), А.С. Уклонским (1940), М.Г. Горбачевым (1968а,б) и другими исследователями пясковыми предпосылками позволяет проводить более диф-

ференцированную прогнозную оценку территорий и рекомендовать для поисков конкретные участки. Предлагаемая методика разработана на материалах, не зависящих от степени разбуренности района, что позволяет широко использовать его при прогнозировании слабоизученных территорий.

#### Литература

- Валеев Р.Н. Тектоника Вятско-Камского междуречья. — Труды Геол. ин-та, вып. 12. Казань, 1968.
- Валеев Р.Н. Горизонтальные сдвиговые движения земной коры востока Русской платформы. — Труды Геол. ин-та, вып. 30. Казань, 1970.
- Валеев Р.Н. Геотектонические условия размещения галогенных формаций Русской платформы. — В кн.: Галогенные формации Украины и связанные с ними полезные ископаемые. Киев, Изд-во "Наукова Думка", 1971.
- Горбачев М.Г. Структурно-тектонические закономерности размещения и строения месторождений самородной серы Амударьинского сероносного региона. — Труды Геол. ин-та, вып. 20. Казань, 1968а.
- Горбачев М.Г. Перспективы сероносности Средней Азии. — Труды Геол. ин-та, вып. 20. Казань, 1968б.
- Иванов А.А., Левицкий Ю.Ф. Геология галогенных отложений (формаций) СССР. М., Госгеолтехиздат, 1960.
- Корневский С.М., Воронова М.Л. Геология и условия формирования калийных месторождений Прикаспийской синеклизы и Южно-Предуральского прогиба. М., "Недра", 1966.
- Соколов А.С. Основные закономерности геологического строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. — Сов. геол., 1958, 5.
- Соколов А.С. Состояние и основные проблемы геологических исследований по самородной сере. — В кн.: Геология месторождений самородной серы. М., "Недра", 1969.
- Уклонский А.С. Парагенезис серы и нефти. Ташкент, Изд. Узбекского филиала АН СССР, 1940.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОВ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ САМОРОДНОЙ СЕРЫ

Многолетний опыт поисково-разведочных и эксплуатационных работ подтвердил теоретические построения А.С. Соколова, А.И. Отрешко, Н.П. Юшкина, Г.М. Власова и других относительно закономерностей размещения и формирования месторождений самородной серы. Установлено, что месторождения серы как в осадочных, так и в вулканогенных породах характеризуются определенными литологическими и структурно-тектоническими условиями, гидродинамическим и гидрохимическим режимом и другими особенностями, определяющими геологические предпосылки для выявления перспективных районов и составления прогнозных карт на самородную серу.

Вместе с тем определилась недостаточная эффективность применяющихся методов поисков месторождений и залежей серы на выделенных прогнозно-перспективных площадях. Ни один из них, за исключением колонкового бурения, не стал надежным способом обнаружения серных руд. Этим объясняется быстрый рост объемов поискового бурения и значительное увеличение стоимости работ.

В этих условиях возникла необходимость разработки геохимических методов поисков серы, более широкого применения геофизических методов и их комплексного использования при поисковых и разведочных работах на самородную серу.

На основе существующих представлений об условиях формирования серных залежей и опыта их изучения на стадиях разведки и эксплуатации можно определить совокупность специфических черт серных месторождений и найти соответствующие методы их выявления.

Согласно А.С. Соколову (Краткое . . . , 1968), поисковые категории применительно к месторождениям серы могут быть разделены на три группы: 1) явления, определяющие возможность образования месторождений, 2) явления, сопутствующие процессу формирования месторождений, 3) явления, возникающие в связи с фактом существования месторождений.

К первой группе относятся региональные и локальные литологические и структурно-тектонические факторы, которые не являются признаками месторождений серы, но необходимы для их образования. Эти факторы выявляются при геологическом анализе территорий и образуют комплекс предпосылок для прогноза и поисков серы.

Более значительную роль для поисковых работ играют явления второй группы. Образование серных руд — сложный геохимический процесс, развивающийся в тесной связи с другими минералого-геохимическими преобразованиями. Поэтому в качестве поисковых предпосылок выступают такие явления, как вариации изотопных отношений в элементах, образование типоморфных минералов, изменение химического состава и физических свойств пород и др. Эти явления хотя и не несут информа-

ции о наличии серных залежей, но свидетельствуют о том, что процесс образования серы имел место.

Следовательно, минералого-геохимические предпосылки позволяют конкретизировать площади для поисковых работ, а также выделить потенциально сероносные и безрудные структуры и участки. Для этих целей применяют методы петрографического, минералогического, спектрометрического и изотопного анализов. Например, методы генетической диагностики известняков и вторичных сульфатов по изотопному составу углерода и серы, а также методы исследования структурных и морфологических особенностей серы и ассоциирующих с ней минералов дают важные поисковые предпосылки. В вулканических областях методы минералого-петрографического и спектрометрического анализов позволяют выделять потенциально сероносные вторичные кварциты из общей массы гидротермально измененных пород.

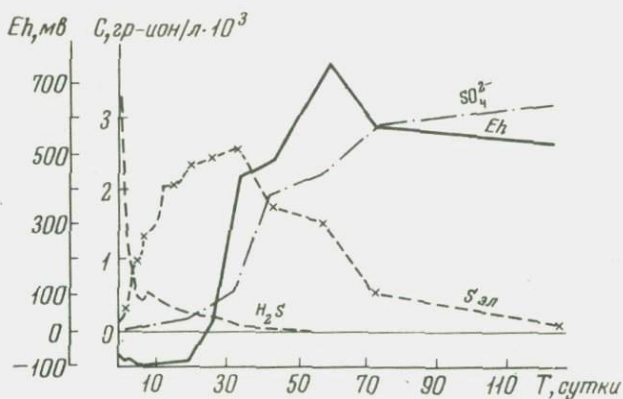
Третьей группе явлений как прямым признакам наличия серных руд принадлежит особая роль при проведении поисков. Здесь можно выделить два типа явлений. Одни из них связаны с условиями устойчивого существования серных залежей в зоне гипергенеза, другие — с условиями их разрушения, главным образом с окислением серы.

Сера относится к числу элементов, весьма активных в зоне гипергенеза, причем главная роль в приповерхностных геохимических процессах принадлежит крайним членам ее валентного ряда  $S^{2-}$ — $S_2^{2-}$ — $S^0$ — $S_2O_3^{2-}$ — $SO_3^{2-}$ — $SO_4^{2-}$ . Элементарная сера ( $S^0$ ) с физико-химической точки зрения представляет собой состояние перехода серы от анионной к катионной форме и потому может быть устойчива лишь при условии равенства активностей этих форм. Этим, в частности, объясняется выпадение серы при смешении сульфатных кальций-натрий-магниевых вод с содержащими сероводород хлоридными натриевыми рассолами независимо от парциального давления кислорода (Юшкин, 1962). Экспериментальные данные М.Ф. Стащук (1968) также показывают, что максимум выпадения серы и точка ее стабилизации соответствует точке установления равенства активностей сульфидной и сульфатной серы (фиг. 1).

Важную роль в стабилизации элементарной серы играют окислительно-восстановительное состояние и рН среды. Согласно Eh—рН диаграммам Р.М. Гаррелса (фиг. 2), элементарная сера устойчива в слабо окислительных условиях только в сильно кислых средах, а в слабо восстановительных условиях — при широких колебаниях рН вплоть до слабо щелочной среды. При этом на устойчивость серы почти не влияет катионный состав растворенных веществ и твердой фазы (Гаррелс, Крайст, 1968).

Очевидно, геологической среде, в которой устойчиво существуют серные руды, свойственна специфическая физико-химическая обстановка, которая может быть обнаружена геохимическими, физико-химическими или геофизическими методами.

Серные залежи заключены в своеобразную газо-гидрооболочку, которая регулирует физико-химическое равновесие системы подземные воды — сера-вмещающие породы, где подземные воды выполняют функцию буферной фазы. Зная пределы вариаций состава, окислительно-восстановитель-



Фиг. 1. Динамика окисления сероводорода, растворенного в воде, кислородом воздуха (по материалам М. Ф. Сташука)

ного потенциала и кислотности вмещающей среды при стабильном состоянии элементарной серы, можно выделить участки вероятного залегания серных руд.

Важная роль гидрохимической и гидродинамической обстановки для формирования серных месторождений подчеркивалась многими исследователями (Уклонский, 1940; Соколов, 1959; Юшкин, 1969; Алексенко, 1967; Гуревич и др., 1970; Власов, Яроцкий, 1971; и др.). Сохранность серных залежей также в значительной мере определяется этой обстановкой.

Данные об окислительно-восстановительных и кислотных свойствах подземных вод некоторых месторождений показывают, что они, как правило, равновесны серным рудам вне зоны окисления и резко неравновесны в пределах этой зоны (см. фиг. 2).

Таким образом, первым прямым признаком наличия серной залежи является гидрохимическая аномалия в зоне ее залегания при определенных значениях  $Eh$  и  $pH$  вод. Такая аномалия может быть зафиксирована как методом полевого гидрохимического анализа, так и потенциометрическим методом измерения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и  $pH$  в грунтах и подземных водах в естественных условиях их залегания.

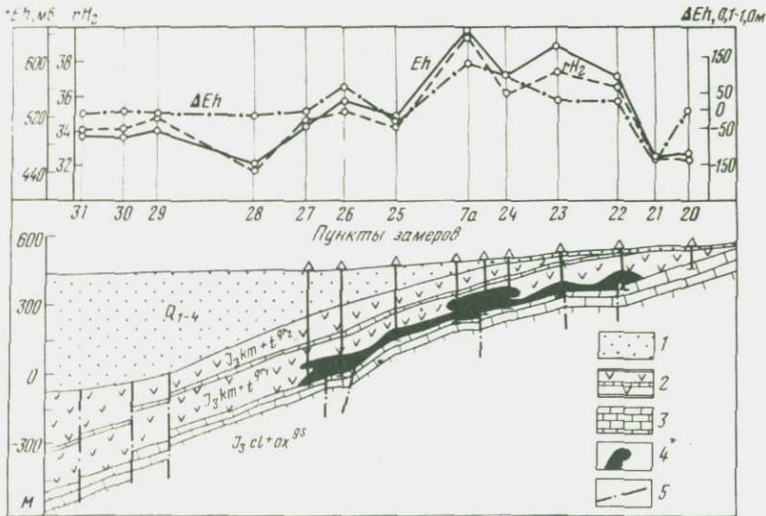
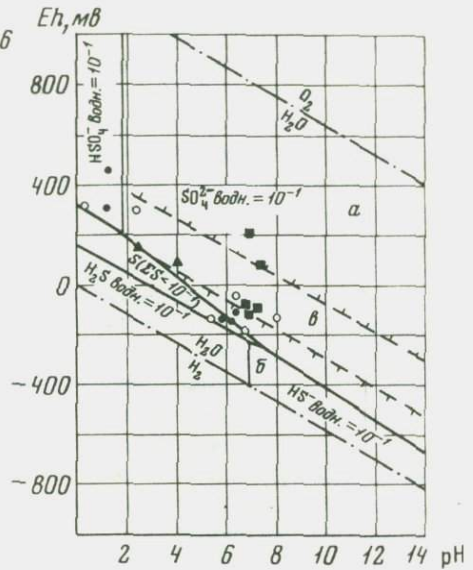
Кратко остановимся на принципе последнего метода.

Как известно, никакая природная геологическая система не является абсолютно замкнутой, т.е. любой элемент геологического пространства находится в гидродинамической и физико-химической связи с другими элементами, и в процессе развития системы переходит в состояние относительного физико-химического равновесия с ними. Это полностью относится и к поверхностным рыхлым образованиям, перекрывающим более древние породы разного состава. Вероятно, над породами в различном физико-химическом состоянии поверхностные рыхлые грунты



Фиг. 2. Eh-pH-диаграмма подземных вод некоторых месторождений самородной серы

1 - поля равновесия серосодержащих компонентов в воде (по Р.М. Гаррелсу, Ч.Л. Крайсту); 2 - границы зон (а - зона существования тионовых бактерий, б - зона распространения сульфат-редуцирующих бактерий, в - переходная зона, по данным М.В. Иванова); 3-6 - месторождения: 3 - Роздольское, 4 - Малейвойямское, 5 - Гаурдакское (по данным М.С. Гуревича), 6 - Гаурдакское (по данным авторов)



Фиг. 3. Окислительно-восстановительный потенциал четвертичных суглинков. Гаурдакское месторождение серы, профиль II-II

1 - четвертичные отложения; 2 - гипсы, ангидриты и известняки гаурдакской свиты; 3 - известняки гиссарской свиты; 4 - сероносные залежи; 5 - дизъюнктивные тектонические нарушения

будут иметь разные значения ОВП и рН, даже если их состав совершенно однороден. Тогда, измеряя ОВП и рН этих грунтов, можно получить вполне определенную информацию о физико-химическом состоянии подстилающих пород. В конкретном случае можно зафиксировать наличие на глубине таких физико-химических условий, которые характерны для зоны залегания серных руд.

Измерения проводятся потенциометрическим методом с помощью переносного рН-метра - милливольтметра по известной методике (Вдовиченко, Лазарев, 1972 и др.). Приведем некоторые результаты применения этого метода на Гаурдакском и Малетойваямском месторождениях, где он прошел опытные испытания и внедряется в практику поисковых работ.

Полученные данные показывают, что окислительно-восстановительное состояние поверхностных грунтов над серными залежами и вне площадей развития сероносных пород различно (фиг. 3, см. таблицу). Для Гаурдакского месторождения на фоне общего повышения ОВП наблюдаются вариации как абсолютных значений  $E_h$ , так и величин приращения ОВП по вертикали в одном и том же пункте ( $\Delta E_h$ ). Положительные аномалии  $E_h$  отмечаются в тех точках, где происходит окисление элементарной серы или сероводорода, мигрирующего от рудных тел к земной поверхности, до сульфата. Свободный сероводород либо отсутствует, либо концентрация его мала. Практически эти аномалии можно увязать с зонами интенсивного окисления серных залежей или с зонами достаточно глубокого их залегания, где влияние ореола  $H_2S$  сильно ослаблено перекрывающими породами.

Показатели геохимической обстановки в четвертичных отложениях Гаурдакского месторождения серы

Показатель	Рудные зоны		Безрудные зоны	
	Количество пунктов наблюдений	Средние значения	Количество пунктов наблюдений	Средние значения
$E_h$	49	+473	65	+451
$\Delta E_h$	49	+19	65	+5
рН	31	8,1	33	8,3
fEh	45	57	62	43

Примечания:  $E_h$  - промежуточный окислительно-восстановительный потенциал, измеренный по истечении 15 мин после установки электрода в грунт;

$\Delta E_h$  - величина приращения ОВП по вертикали в одном и том же пункте (на глубине 1 м);

fEh - величина приращения ОВП во времени (за 15 мин). В случае наличия серы на глубине величина  $E_h$  над участками развития сероносных пород выше фоновых значений.

Отрицательные аномалии  $E_h$  зафиксированы, как правило, на тех участках поверхности, где серные руды, содержащие сероводородные воды, залегают неглубоко и сильное влияние на ОВП оказывает  $H_2S$ , либо серные залежи связаны с тектонически ослабленными зонами, по которым значительное количество сероводорода проникает в поверхностные грунты.

Статистическая обработка результатов потенциометрии на Гаурдакском месторождении показала вероятностный характер распределения величин  $E_h$ . Как показывают кривые плотности распределения значений  $E_h$  и  $\Delta E_h$ , над рудными и безрудными породами они подчиняются нормальному закону распределения с максимумами в области величин  $E_h$ , равной 450 мВ. Эта величина является фоновой для района Гаурдакского месторождения и имеет принципиальное значение при интерпретации потенциометрических данных.

Фоновой величине ОВП (при  $pH=1$ ) соответствуют нижние границы существования тионовых бактерий (Иванов, 1964) и распространения свободного кислорода (см. фиг. 2). В выщележащей зоне происходит развитие сероокисляющих бактерий, образование серной кислоты, снижение  $pH$  грунтов и как следствие этого рост ОВП.

Таким образом, величины  $E_h$  и  $pH$  являются надежными поисковыми признаками серных залежей.

Есть еще один качественный критерий, позволяющий в какой-то мере нейтрализовать влияние на интерпретацию распределения величин ОВП неблагоприятных факторов. Если рассмотреть закономерность вариаций приращения потенциала в разрезе ( $\Delta E_h$ ), то можно заметить, что над безрудными породами значительных изменений величины  $E_h$  на глубину в большинстве случаев не отмечается, в то же время над сероносными породами наблюдаются значительные колебания величины  $\Delta E_h$ . При этом установлена асимметрия в распределении  $\Delta E_h$  по знаку – над рудными телами наиболее вероятны положительные значения  $\Delta E_h$ , т.е. снижение потенциала на глубину.

Хотя вероятность обнаружения серной залежи по данным потенциометрии не превышает 0,7, мы получаем вполне надежный критерий прямого их поиска. Практически нельзя получить полного совпадения аномалий с контурами рудных тел, так что задача потенциометрического метода – выявление контуров рудного поля или границ месторождения в целом, а не составляющих его рудных тел. Для геометризации отдельных рудных тел потенциометрическим методом необходимы дальнейшие исследования, главным образом в направлении получения надежных количественных показателей и разработки метода обработки данных по измерению ОВП и физического моделирования потенциального поля такого типа на электроинтеграторах.

В настоящее время задача геометризации рудных тел с точностью, достаточной для целей разведки, может быть решена применением в комплексе с потенциометрией  $E_h$  геофизических методов, главным образом электротометрии в различных модификациях (ЭЭП, ЭП, ВЭЗ, ВП). На месторождении Камчатки с помощью электротометрии весьма успешно решаются некоторые поисковые и разведочные задачи.

Необходимость комплексирования метода потенциометрии с электро-разведочными методами определяется следующим.

В связи со спецификой гидрохимической среды существования серных руд в естественных условиях физические и физико-химические свойства системы раствор — порода зависят от условий равновесия фаз этой системы. Действительно, в неравновесной системе такого рода ее фазы в результате активного взаимодействия находятся в неустойчивом состоянии, подвижность входящих в них компонентов возрастает. Благодаря этому они легко поддаются внешнему воздействию наведенного электрополя, т.е. их сопротивление снижается. В отдельных случаях такие системы способны сами создавать естественные электрические поля (Яроцкий, 1969). Напротив, в равновесных системах, в которых состояние фаз не изменяется во времени, подвижность компонентов резко ограничена. Электрическое сопротивление таких систем относительно велико и естественные электрические поля в этом случае не возникают.

Указанные свойства природных систем могут быть положены в основу интерпретации данных электротометрии с использованием определений ОВП. Например, в окислительно-восстановительных условиях стабилизации серные руды будут выражены в геоэлектрическом разрезе, построенном с помощью вертикальных электротомирований (ВЭЗ), горизонтами относительно высоких значений кажущихся сопротивлений ( $\rho_K$ ) по сравнению с вмещающими их породами (глинистыми, сульфатными, карбонатными, кремнистыми и т.д.). Наоборот, в окислительных условиях, при разрушении серных залежей, серносные породы будут иметь низкие  $\rho_K$  по сравнению с вмещающими породами, устойчивыми в этой обстановке. В практике поисковых работ это обычно не учитывается, в связи с чем часто отрицается эффективность электротометрии, а также применяются различные принципы выделения рудных тел по геофизическим данным. На Гаурдакском месторождении, например, с рудным горизонтом по геофизическим данным ассоциируют низкоомную часть геоэлектрического разреза. На Камчатке и в Японии серные руды выделяются обычно высокоомным горизонтом (Власов, Яроцкий, 1971). На предкарпатских месторождениях геофизики считают, что сероносные породы вообще не выражаются в геоэлектрическом разрезе.

Скважинными методами электротометрии на всех месторождениях установлено, что серные руды обладают обычно большими значениями  $\rho_K$ , чем вмещающие породы, но иногда отмечается и обратная картина. Объяснить такие отклонения можно с учетом данных по окислительно-восстановительным условиям.

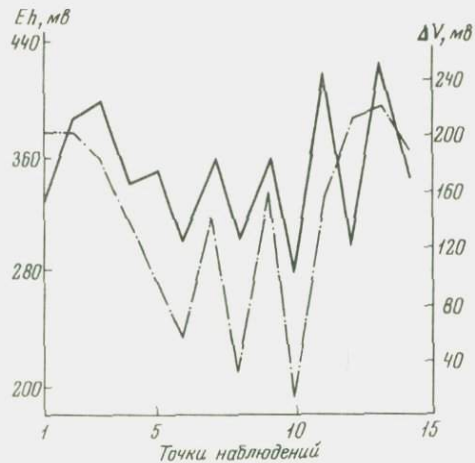
Экспериментальная проверка этой взаимосвязи окислительно-восстановительных и электрических свойств природных систем проведена пока только на Малетойваямском месторождении, где простота гидрохимической обстановки позволяет выявить эту взаимосвязь сравнительно легко. Здесь же установлена окислительно-восстановительная природа естественных электрических полей (ЕЭП), возникающих на участках окисления серных руд, выходящих на поверхность (фиг. 4).

По косвенным признакам эта взаимосвязь отмечается и на Гаурдаке. Например, в скважинах, расположенных в гидрохимических условиях, характерных для серного месторождения (IV участок, скв. 114/IV, Шурчинский участок, скв. 2III), гипс-ангидриты имеют высокое сопро-



Фиг. 4. Графики значений  
ЕЭП и ОВП. Малетойваям-  
ское месторождение серы,  
профиль 44

1 - значения ОВП; 2 -  
значения ЕЭП



тивление по сравнению с глинами, тогда как за пределами Гаурдакской структуры (участок Ходжа-Караул, скв. 5п, 7п) наоборот — глины имеют более высокое сопротивление, чем гипс-ангидриты.

К сожалению, имеющиеся гидрохимические и потенциометрические данные по основным месторождениям страны недостаточны для получения строгих количественных обоснований описанных закономерностей и пока приходится ограничиться только качественной их характеристикой.

Из всего изложенного следует, что прямой поиск серных залежей и их геометризацию в плане целесообразно осуществлять комплексом методов в составе потенциометрии ( $Eh$  и  $pH$ ) и электротметрии.

#### Литература

- Алексенко И.И. Сера Преджерпатья. М., "Недра" 1967.
- Вдовиченко Г.М., Лазарев И.С. Окислительно-восстановительные условия в четвертичных породах и изотопный состав серы на Гаурдакском месторождении (их поисковое значение). — В кн.: Геохимия и минералогия серы. М., "Наука", 1972.
- Власов Г.М., Яроцкий Г.П. Практическое значение вулканических серных месторождений и методика их освоения. — В кн.: Вулканические серные месторождения и некоторые проблемы гидротермального рудообразования. М., "Наука", 1971.
- Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М., "Мир", 1968.
- Гуревич М.С., Беленицкая Г.А., Померанц Л.Б. Палеогидрогеологические условия образования Гаурдакского серного месторождения. — В кн.: Методика палеогидрогеологических исследований. Ашхабад, 1970.
- Иванов М.В. Роль микробиологических процессов в генезисе месторождений самородной серы. М., "Наука", 1964.
- Краткое методическое руководство по прогнозу месторождений самородной серы среди осадочных образований. — Изд. Геол. ин-та. Казань, 1968.
- Соколов А.С. Геологические закономерности строения и размещения месторождений самородной серы. — Труды ГИГХСа, вып.5. М., Госхимиздат, 1959.

- Сташук М.Ф. Проблема окислительно-восстановительного потенциала в геологии. М., "Недра", 1968.
- Уклонский А.С. Парагенезис серы и нефти. Ташкент, Изд. Узбекского филиала АН СССР, 1940.
- Юшкин Н.П. Геологические особенности и генезис серных месторождений района Шор-Су. Узбекская ССР. - Изв. АН СССР, серия геол., 1962, № 4.
- Юшкин Н.П. Метасоматический тип месторождений самородной серы и его место в общей схеме катагенеза. - В кн.: Геология месторождений самородной серы. М., "Недра", 1969.
- Яроцкий Г.П. К вопросу об эффективности геофизических методов при поисках скрытого серного оруденения в Северо-Камчатском сероносном районе. - В кн.: Материалы по геологии и полезным ископаемым Корякского нагорья. Петропавловск-Камчатский, Дальневосточное книжное изд-во, 1969.

## МЕТОДЫ РАДИОАКТИВНОГО КАРОТАЖА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЕРНЫХ РУД КАРБОНАТНОГО ТИПА

Методами, оптимально пригодными для выделения и количественной оценки серных руд карбонатного типа, являются кислородный каротаж и спектрометрический нейтронный гаммакаротаж (НГС—С; Кедров, 1968; Блюменцев, Онисько, Фельдман, 1971; Фельдман и др., 1968). Однако отсутствие до настоящего времени серийной аппаратуры для реализации данных методов не позволяет использовать их в практике каротажных работ.

Для литологического расчленения разреза скважин, выделения серных руд и оценки серосодержания предложен комплекс методов реактивного каротажа, включающий плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК—П) и нейтронный каротаж по надтепловым нейтронам (НК—Н), осуществляемый с использованием каротажных радиометров интегрального типа. Интерпретация данных комплекса методов ГГК—П и НК—Н сравнительно проста для серных руд мономинерального типа, к которым относятся наиболее широко распространенные известняковые серные руды. При более сложном составе серных руд необходимо в общем случае одновременное сочетание не менее трех методов каротажа, либо дополнительное привлечение соответствующей геологической информации.

В настоящей статье рассматриваются перспективы использования комплекса методов радиоактивного каротажа (ГГК—П; НК и ГК) на месторождениях серных руд карбонатного типа.

Серные руды этого типа незначительно отличаются от вмещающих пород по удельному сопротивлению, естественной гамма-активности, эффективному атомному номеру, а также по способности рассеивать и поглощать нейтроны (Онисько, 1970). Эти обстоятельства не позволяют определять содержание серы непосредственно по данным стандартных методов каротажа (КС, ПС, НКГ, ГК), а также по данным гамма-гамма-каротажа или нейтронного каротажа при их независимом использовании.

Однако комплексное использование измерения методами ГГК—П, НК и ГК дает иные результаты. С помощью этих методов возможно определение плотности и влажности пород и руд, литологическое расчленение разреза скважин, выделение в разрезе ослабленных зон, интервалов закарстованности, глинистых серных руд и оценка степени глинистости пород разреза. Положительные предпосылки существуют также для использования комплекса ГГК—П и НК при выделении серных руд и определении содержания в них серы.

Из расчетных и экспериментальных работ известно, что для серных руд существует обратная зависимость линейного вида между их удельным весом ( $d$ ) и содержанием в них серы ( $C_s$ ). При наличии данных об удельном весе серных руд указанная зависимость может быть использована для оценки серосодержания. Однако величина удельного веса

не может быть непосредственно определена по данным каротажа скважин. Такие определения возможны лишь косвенным способом, либо при наличии связи между удельным весом и эффективным атомным номером, либо по данным о плотности ( $\rho$ ) и пористости ( $K_{II}$ ) пород. Для серных руд первый способ не применим, так как их эффективный атомный номер не зависит от содержания серы.

Второй способ основан на наличии связи вида

$$\rho = d(1 - K_{II}) + d_{ж} K_{II}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность породы;

$d$  — удельный вес;

$K_{II}$  — коэффициент пористости;

$d_{ж}$  — плотность жидкости, заполняющей поры породы.

Для конкретных месторождений  $d_{ж}$  является постоянной величиной (или известно ее изменение) и определяется в результате анализа проб пластовой жидкости, полученных из скважин.

Для случая пресной воды в порых ( $d_{ж} = 1 \text{ г/см}^3$ )

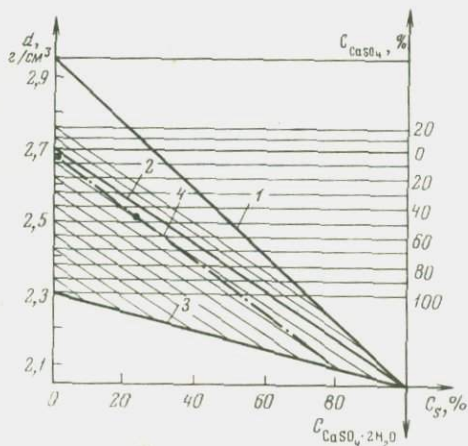
$$d = \frac{\rho - K_{II}}{1 + K_{II}} \quad (2)$$

Значения  $\rho$  и  $K_{II}$  определяются по данным ГГК-П и НК с погрешностью, соответственно составляющей для осадочных пород карбонатного типа 1-2 и 10-20% (Басин и др., 1968).

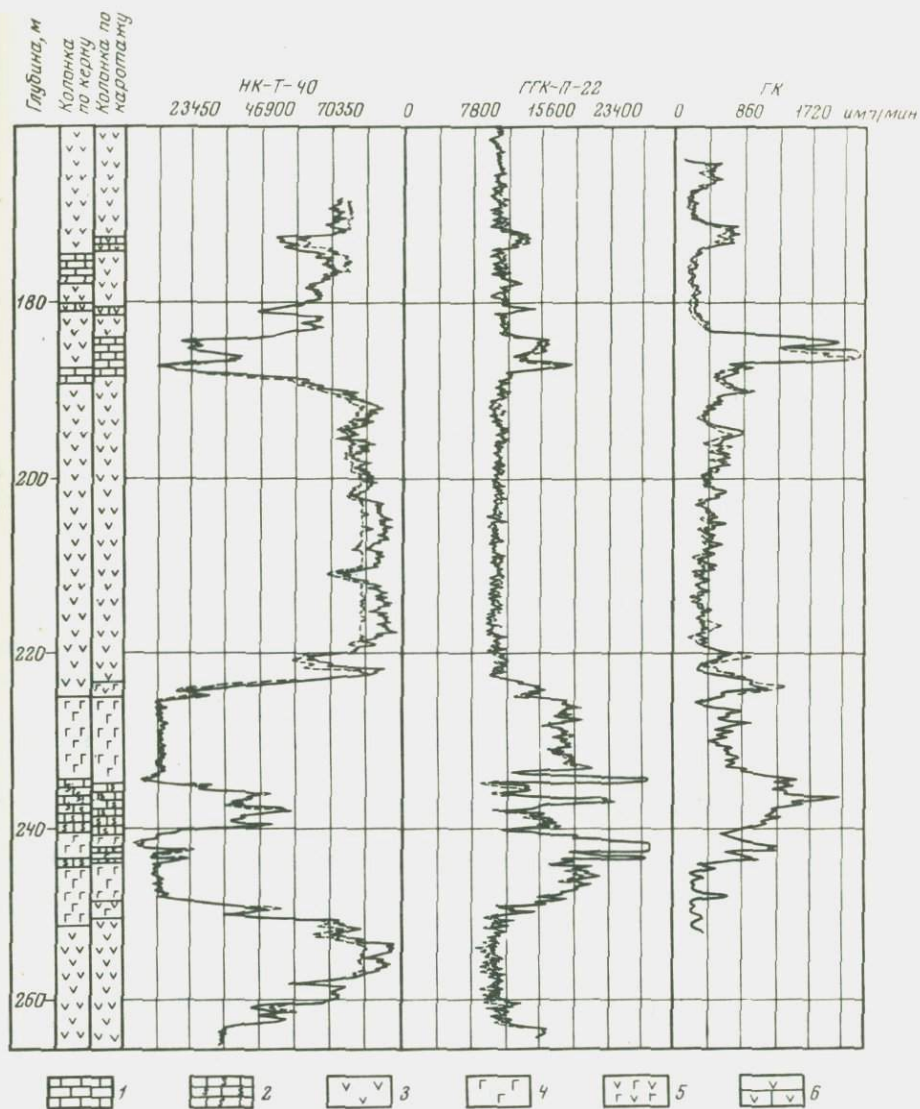
Ошибка при определении находится из выражения

$$\partial d = \frac{d\rho}{1 - K_{II}} + \frac{\rho - 1}{(1 + K_{II})^2} d K_{II} \quad (3)$$

и составляет соответственно от 2,4 до 3,6%.



Фиг. 1. Зависимость удельного веса ( $d$ ) серных руд от их минерального состава. Расчетные зависимости для ангидрита и серы (1), известняка и серы (2), гипса и серы (3), экспериментальная зависимость, полученная на моделях (4)



Фиг. 2. Литологическое расчленение разреза комплексом методов радиоактивного каротажа (пунктиром показаны повторные измерения). Гаурдакское месторождение серы, скв. 19/IV

1 - известняк; 2 - серная руда; 3 - ангидрит; 4 - гипс; 5 - гипс-ангидрит; 6 - ангидрито-известняковая порода

Таблица 1

Скорость счета, измеренная различными геофизическими методами в породах Гаурдакского месторождения

Порода	Метод		
	НК-Т-40	ГГК-П-22	ГК
Известняк	127 000	29 000	960
	1,0	1,0	1,0
Ангидрит	127 000	9700	730
	1,0	0,3	0,8
Гипс	11 000	18 500	700
	0,09	0,6	0,7
Серная руда	58 500	16 000	1100
	0,5	0,5	1,1

Примечание. Числитель - средняя скорость счета в имп/мин., знаменатель - относительное изменение в скорости счета по сравнению со скоростью счета в известняках.

В соответствии с номограммой (фиг. 1) определение со средней погрешностью 3% приведет к ошибке в оценке  $C_s$  равной  $\pm 10\%$ .

Таким образом, несмотря на относительно невысокую точность определения  $C_s$  комплексным методом, применение его может быть эффективным при выявлении серных руд и предварительной оценке их серо-содержания.

Необходимым условием для получения достоверных данных комплексом методов ГГК-П и НК является постоянство минерального состава серных руд или возможность учета его изменений, а также наличие данных об изменении диаметра скважин.

Опробование комплекса методов ГГК-П, НК и ГК для выделения и количественной оценки серных руд выполнено на одном из участков Гаурдакского месторождения. Измерения проведены двухканальным скважинным радиометром типа ДРСТ-2. Нейтронный каротаж выполнен при размерах зонда 30 и 40 см с использованием Po-Be источника нейтронов. При проведении ГГК-П было применено специальное зондовое устройство (Фельдман, Бломенцев, Караниколо, 1971) с длиной зонда 22 см и источник  $C_s$  - 137. В исследованных скважинах породы представлены ангидритами, гипсами, ангидрито-гипсами и известняками, безрудными и содержащими самородную серу. Глубина скважин от 40 до 500 м. В интервале исследований диаметр скважин 112 мм.

Анализ диаграмм комплекса методов (фиг. 2; табл 1) позволил установить, что основные типы вмещающих пород и серные руды различаются по уровню показаний различных методов. Если в методе НК наибольшими показаниями отмечаются ангидриты и известняки, промежуточными - серные руды и наименьшими - гипсы, то в методе ГГК-П наблю-

Оценка точности определения серы комплексом методов в сравнении с керновым опробованием

Номер скважины	Содержание серы, %		$\delta$ (x - y)	$\delta^2$
	кern (x)	комплекс (y)		
25-ф	26,5	25,3	1,2	1,44
	20,6	18,0	2,6	6,76
152	16,5	14,6	1,9	3,61
153	25,27	20,5	4,77	22,75
24/2	15,2	22,4	-7,2	51,84
				$\Sigma 86,4$

$$\delta = \pm 4,6\%$$

дается обратная картина, т.е. показания возрастают при переходе от ангидритов к известнякам, серным рудами и гипсам. В методе ГК минимальными значениями выделяются гипсы и ангидриты, повышенные показания характерны для известняков и серных руд.

Заметим, что отмечаемые на каротажных диаграммах границы между рудами и вмещающими породами резкие в случае простого состава контактирующих пород.

Получены также предварительные данные, позволяющие судить о положительных возможностях комплекса методов для количественной оценки серных руд (табл. 2).

При интерпретации данных комплекса методов ГГК-П и НК использовались зависимости, полученные на моделях серных руд и вмещающих пород  $I_{НК} = f(K_{П})$ ,  $I_{ГГК-П} = f(\rho)$  и  $I_{ГГК-П} = f(K_{П})$ . Использование этих зависимостей правомерно, поскольку использованные для построения модельные среды близки по вещественному составу породам и рудам в скважинах. Тем самым автоматически учитывается влияние на показания ГГК-П присутствия гипса или ангидрита в скважинах.

Сравнение содержания серы в отдельных интервалах по данным комплекса методов и химического анализа керновых проб показывает большое расхождение между ними. Существенно лучшее совпадение между данными каротажа и анализа проб керна наблюдается при определении средневзвешенного содержания серы по всей мощности рудной залежи. Как видно из табл. 2, среднеквадратичная ошибка в определении серо-содержания ( $\delta$ ) составляет  $\pm 4,6\%$ .

Полученные результаты следует рассматривать как предварительные, так как методика определения содержания серы комплексом методов ГГК-П и НК находится лишь в стадии разработки для серных руд сложного состава.

## Литература

- Басин Я.Н., Кухаренко Н.К., Тюкаев Ю.В. Методика определения пористости карбонатных пластов по данным нейтронного каротажа с серийной аппаратурой радиоактивного каротажа. М., Изд-во ОНТИ ВНИИЯГГ, 1968.
- Блюменцев А.М., Онисько М.К., Фельдман И.И. Применение спектрометрического нейтронного гамма-каротажа для изучения серных руд в скважинах. - Труды ВНИИЯГГ, вып. 9, 1971.
- Кедров А.И. Исследование скважин на содержание в пластах самородной серы методом кислородного каротажа с применением импульсного генератора нейтронов. - В кн.: Импульсный нейтронный каротаж. М., Изд-во ОНТИ ВНИИЯГГ, 1968.
- Онисько М.К. Применение комплекса методов радиоактивного каротажа для литологического расчленения разреза и выделения серных руд в скважинах на Гаурдакском серном месторождении. - В кн.: Ядерно-геофизические и геохимические методы. М., Изд-во ОНТИ ВНИИЯГГ, 1970.
- Фельдман И.И., Караниколо В.Ф., Блюменцев А.М., Онисько М.К. Повышение эффективности поисково-разведочного бурения на хромиты при использовании данных радиоактивного каротажа скважин и перспективы применения радиоактивных методов исследования скважин на месторождениях серы. - Тезисы докладов VI научно-технической геофизической конференции. Л., Гостоптехиздат, 1968.
- Фельдман И.И., Блюменцев А.М., Караниколо В.Ф. Исследование зондового устройства к аппаратуре ДРСТ-2 для проведения плотностного гамма-каротажа. - Труды ВНИИЯГГ, вып.9, 1971.

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕРЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫПЛАВКОЙ И ОБОСНОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ СЕТИ СКВАЖИН

Согласно планам развития серной промышленности производство элементарной серы в нашей стране в ближайшие годы должно быть резко увеличено. Поэтому возникла задача освоения недоступных для открытой добычи глубоких горизонтов серных залежей весьма эффективным методом подземной выплавки серы — ПВС (Аренс, Степанов, 1969, Степанов, 1969). В настоящее время в СССР разработка месторождений методом ПВС находится в стадии промышленного освоения (Аренс и др., 1970, 1971). Решающее значение для применения способа ПВС в промышленных масштабах имеет правильная оценка геологических и гидрогеологических условий серных месторождений. Эта оценка зависит в первую очередь от методики их разведки и изучения (Степанов, 1970).

Особенности методики разведки и оценки месторождений для подземной выплавки серы обусловлены специфическими требованиями метода ПВС к геологической и гидрогеологической изученности серных залежей. Эти особенности заключаются в существенном возрастании объема разведочной информации, что обусловлено введением в состав оценочных показателей дополнительных технологических, горнотехнических, гидродинамических, водно- и теплофизических параметров, а также усилением роли комплексного геолого-математического анализа данных разведки с использованием статистических, аналоговых и других методов для оценки условий эксплуатации.

Методика геолого-гидрогеологических исследований серных месторождений для ПВС базируется на традиционных приемах и способах разведки и использует помимо общепринятых некоторые новые геологические, гидрогеологические, геохимические и геофизические методы. Основная особенность этой методики — увеличение в общем объеме геологоразведочных работ на всех стадиях гидрогеологических и геофизических исследований, а также физико-технологических испытаний.

Рекомендуемая методика геолого-гидрогеологического изучения серных месторождений для ПВС включает следующие стадии (Соколов, 1967).

Поиски — геологическая и гидрогеологическая съемки района масштаба не менее 1:5000 с использованием потенциометрии, изотопных исследований серы и углерода, микробиологического опробования; электро- (профилирование, ВЭЗ), грави-, магнито- или сейсморазведка и потенциометрия на наиболее перспективных участках в масштабе 1:10000–1:25000, бурение скважин для заверки геологических, гидрогеологических, геофизических или геохимических аномалий; опробование рудного керна на серу с отбором единичных образцов на лабораторные исследования выплавляемости серы, водно- и теплофизических свойств;

гидрогеологическое опробование поисково-разведочных скважин кратковременными одиночными откачками, наливом, "мгновенным" наливом или самоизливом и их геофизический каротаж методами КС, ПС, ГК, НГК, а также термометрия или расходометрия. Плотность разведочной сети, включающей скважины, геофизические и геохимические точки, должна обеспечивать по выявленным серным залежам подсчет запасов по категории  $C_2$  и прогнозные запасы серы.

Предварительная разведка - геофизическое и геохимическое профилирование и зондирование (методами, указанными выше) в масштабе 1:2000-1:5000; бурение скважин с учетом неоднородности геофизических и геохимических полей и на их основе - составление геолого-структурной карты месторождения в том же масштабе и разрезов к ней; опробование рудного керна на серу с отбором образцов по основным геологическим типам пород и руд на определение подробного химического состава, выплавляемости серы, водно-, теплофизических, механических и других физических свойств; гидрогеологическое опробование всех пройденных скважин пробными откачками, наливом, "мгновенным" наливом или самоизливом; геофизический каротаж всех пройденных скважин методами КС, ПС, ГК, НГК, кавернометрии, термометрии, расходометрии; режимные наблюдения за подземными водами; единичные пробные испытания эффективности методов искусственного воздействия на фильтрационные свойства руд (кислотная обработка, торпедирование, глинизация и другие) для участков, не удовлетворяющих требованиям промышленности по водопроницаемости. Плотность разведочной сети должна обеспечить получение запасов по категории  $C_1$ .

Детальная разведка - геофизическое и геохимическое профилирование и зондирование в масштабе до 1:1000; бурение скважин по сгущенной сети на участках первоочередного освоения и уточнение деталей строения залежей; опробование на серу и отбор образцов по основным типам руд и пород геологического разреза на определения, аналогичные перечисленным в предыдущей стадии разведки; гидрогеологическое опробование и геофизический каротаж пройденных скважин методами, аналогичными таковым в предыдущей стадии разведки; бурение специальных гидрогеологических скважин с опробованием опытными откачками по типам исследуемых участков; продолжение режимных наблюдений за подземными водами; единичные полупромышленные опыты по искусственному воздействию на фильтрационные свойства рудных залежей. Плотность разведочной сети определяется исходя из необходимости получения запасов серы по категориям в требуемых (Инструкция..., 1961) соотношениях для соответствующей группы месторождений по природным факторам, определяющим методику разведки.

Эксплуатационная разведка - уточнение места заложения серодобычных и вспомогательных эксплуатационных скважин (водоотливных, контрольных и т.д.), контроль за технологией их проходки; документация, гидрогеологические (кратковременные нагнетания для определения водопоглощения, режимные наблюдения за подземными водами и т.п.) и геофизические (КС, ПС, ГК, НГК, кавернометрия, термометрия, расходометрия) исследования эксплуатационных скважин; опробование

Таблица 1

Результаты расчета плотности сети скважин аналитическим методом по месторождениям, наиболее перспективным для ПВС (по А.С. Соколову, М.Н. Зайцевой, Е.А. Новиковой и В.И. Степанову)

Участок, горизонт, категория запасов	Применяющаяся плотность сети скважин, м	Для содержания серы		Для мощности серной залежи		Расчетная плотность сети скважин, м	
		Коэффициент вариации, %	Необходимое число скважин (при погрешности 10%)	Коэффициент вариации, %	Необходимое число скважин (при погрешности 10%)	Квадратная сеть	Прямоугольная сеть
Язовское месторождение							
Категория А	100×200	16	3	41	17	271×271	191×382
" В	200×200	14	2	55	30	438×439	310×620
" С <sub>1</sub>	400×600	22	5	48	23	643×644	455×910
Немировское месторождение							
" А	100×100	28	8	90	81	158×159	112×225
" В	200×200	23	9	89	80	339×340	240×480
" С <sub>1</sub>	400×400	20	4	70	49	417×417	295×590
Гаурдакское месторождение							
Участок I Горизонт "F", категория С <sub>2</sub>	300×300	20		104	108	53×53	37×75

Таблица 1 (продолжение)

Участок, горизонт, категория запасов	Применявшаяся плотность сети скважин, м	Для содержания серы		Для мощности серной залежи		Расчетная плотность сети скважин, м	
		Коэффициент вариации	Необходимое число скважин (при погрешности 10%)	Коэффициент вариации	Необходимое число скважин (при погрешности 10%)	Квадратная сеть	Прямоугольная сеть
Участок II							
Горизонт "D", категория В	75×75	40		73	53	67×67	47×94
Горизонт "F", категория В	75×75	28		83	70	47×47	33×67
Участок III							
Горизонт "D", категория В*	50×50	14		66	43	33×33	23×46
Горизонт "F", категория В	50×50	27		83	69	42×43	30×60
Участок IV							
Горизонт "F", категория В*	75×75	47		67	45	62×62	44×88

\* Количество скважин, принятое для расчета, не отвечает минимальному в 25 выработок для месторождений второй группы (по Н.В. Барышеву).

керна этих скважин на серу и ее выплавляемость, на физические свойства (прочность, пористость, кавернозность, трещиноватость и т.п.); опыты по искусственному воздействию на фильтрационные свойства руд и вмещающих пород, на направление потока теплоносителя; контроль за характером и полнотой отработки серной залежи, учет добычи и потерь серы; поддержание такого соотношения запасов серы различных категорий, какое требуется для успешной эксплуатации объекта. Плотность эксплуатационно-разведочной сети (эксплуатационных скважин) определяется проектом разработки месторождения.

Одним из основных вопросов методики разведки для ПВС является сложный и пока еще недостаточно решенный вопрос о системе и плотности сети скважин. В табл. 1 произведен расчет плотности сети скважин по месторождениям, наиболее перспективным для ПВС, методом вариационной математической статистики.

При расчете принята предельная погрешность определений в относительных 10%, рекомендуемая для подсчета запасов по категории А. Все участки серных залежей, разведываемых для ПВС, относятся ко второй группе сложности по природным факторам, определяющим методику разведки, и до категории А не разведываются. Это значит, что при расчете плотности разведочной сети были приняты достаточно жесткие требования. Тем не менее полученная по расчету плотность сети скважин может иметь лишь контрольное значение при ее проектировании, и в каждом конкретном случае она должна корректироваться геологическими соображениями и опытом разведки месторождения.

По Язовскому месторождению проведен анализ необходимой плотности разведочной сети методом разрежения фактической сети скважин (табл. 2). Результаты показывают, что абсолютная и относительная погрешности определения наиболее изменчивого параметра серных залежей (мощности) при разрежении сети в несколько раз колеблются незначительно.

Следовательно, при проведении работ разведочную сеть можно разрезать.

Один из наиболее точных методов оценки достоверности разведки и необходимой плотности сети выработок – сопоставление данных разведки с данными эксплуатации. Такое сопоставление произведено по Гаурдакскому месторождению в контурах блоков балансовых запасов серы 6-В и 9-С<sub>1</sub>, которые отработаны карьером "Южный" (табл. 3).

Сопоставление данных разведки с данными эксплуатации показало хорошую их сходимость, что подтверждает достоверность результатов, полученных по принятой разведочной сети скважин детальной разведки Гаурдакского месторождения, которая составляла 75×75 м как для блока 6-В (категория В), так и для блока 9-С<sub>1</sub> (категория С<sub>1</sub>).

Серные залежи, ранее разведанные под разработку горными выработками, доразведываются для ПВС путем дальнейшего уплотнения разведочной сети. Наиболее рациональна при разведке месторождений для ПВС система геолого-гидрогеологических блоков, на которые подразделяется серная залежь в связи с изменениями геолого-гидрогеологической обстановки, выявляемыми в процессе разведки. Одновременно эти блоки служат и для подсчета запасов руд. Каждый блок должен изучаться

Таблица 2

Результаты расчетов по разряжению разведочной сети скважин,  
Язовское месторождение (по А.С. Соколову, М.Н. Зайцевой)

Категория запасов	Фактическая плотность сети скважин и ее разрежение, м	Содержание серы, вес. %	Относительная погрешность, %	Коэффициент вариации, %	Мощность залежи, м	Относительная погрешность, %	Коэффициент вариации, %
А	100×200	26	3,5	16	13,0	4,7	41
	200×400 (в 2 раза)	25	2,7	16	12,2	8,3	49
	300×600 (в 3 раза)	26	2,6	15	11,7	8,9	50
	400×800 (в 4 раза)	22	8,1	27	10,7	19,8	66
В	200×200	25	2,5	14	9,7	1,0	55
	400×400 (в 2 раза)	25	2,5	18	9,5	1,0	59
	600×600 (в 3 раза,	27	2,7	26	8,4	0,8	58

отдельно с соответствующей дифференциацией плотности сети скважин, опробования, гидрогеологических наблюдений и т.д.

При разведке для ПВС на тех участках крупных серных залежей, которые отличаются более простым строением и равномерной изменчивостью геологических и гидрогеологических параметров (обычно в их центральных частях), плотность сети скважин в некоторых случаях может быть несколько разрежена без ущерба для достоверности получаемых данных по соответствующей категории запасов.

На участках с особо сложным геологическим строением, значительной изменчивостью серного оруденения и гидрогеологических характеристик, в карстовых зонах и краевых частях залежей с извилистыми контурами и наличием безрудных "окон" следует бурить дополнительные скважины, сохраняя геометрически правильную и равномерную сеть обычно более низкой категории запасов.

В зависимости от глубины бурения для проходки разведочных и гидрогеологических скважин предпочтительно применять самоходные буровые установки СБУ-150-ЗИВ, СБУ-300-ЗИВ, УРБ-ЗАМ и другие, а для бурения скважин глубиной свыше 500-600 м более — мощные станки типа ЗИФ-1200А и др.

Конструкция разведочных и гидрогеологических скважин выбирается с учетом литологического разреза пород, их устойчивости, прочности, твердости и буримости. Она должна обеспечить проходку по серной залежи скважины диаметром 85-100 мм с углублением ее в подстилающие породы на 5-20 м. Все разведочные скважины по неустойчивым

Таблица 3

Результаты сравнения данных разведки с данными эксплуатации,  
Гаурдакское месторождение (по А.А. Крестову)

Показатель	Запасы, т		Содержание серы в руде, %	Средняя мощность залежи, м	Площадь блока, м <sup>2</sup>
	руды	серы			
Блок 6-B					
По данным разведки	639 540	141 146	22,07	14,98	21 400
По данным эксплуатации	556 317	129 844	23,34	13,73	20 310
Расхождение:					
в абсолютных значениях	83 223	11 302	1,27	1,25	1 090
в относительных %	13,0	8,0	5,8	8,3	5,1
Коэффициент корреляции	0,87	0,92	1,06	0,92	0,95
Блок 9-C <sub>1</sub>					
По данным разведки	619 641	129 257	-	12,92	24 040
По данным эксплуатации	643 383	134 209	-	14,73	21 894
Расхождение:					
в абсолютных значениях	23 742	4 952	-	1,81	2 146
в относительных %	3,8	3,8	-	14,0	8,9
Коэффициент корреляции	1,04	1,04	-	1,14	0,91
Блоки 6-B и 9-C <sub>1</sub>					
По данным разведки	1 259 181	270 403	-	13,85	45 440
По данным эксплуатации	1 199 700	264 053	-	14,25	42 204
Расхождение:					
в абсолютных значениях	59 481	6 350	-	0,40	3 236
в относительных %	4,7	2,4	-	2,9	7,1
Коэффициент корреляции	0,91	0,98	-	1,03	0,93

породам (глины, мергели, конгломераты, пески и т.п.) до крепких пород (известняки, гипс-ангидриты и т.п.) обсаживаются трубами с обязательной затрубной цементацией.

Опытные гидрогеологические скважины при пересечении серной залежи бурятся диаметром не менее 146 мм с углублением в подстилающие породы на 4–5 м. Эти скважины обсаживаются трубами до сероносной залежи, с обязательной затрубной цементацией.

Гидронаблюдательные скважины бурятся диаметром 89–110 мм до пересечения ими испытываемых горизонтов и обсаживаются трубами до этих горизонтов также с применением затрубной цементации.

После завершения детальной разведки для ПВС все пробуренные на месторождении скважины должны быть обязательно ликвидированы заливкой цемента до устья.

Выход керна при бурении по серным рудам должен быть не менее 80%, по безрудным породам – не менее 75%.

Рекомендуется следующая методика опробования при разведочных работах для ПВС.

1. Химическое опробование содержания серы и нерастворимого остатка по керну скважин на всю мощность рудной залежи по интервалам в среднем через 1 м и подробные химические анализы по всем основным разновидностям руд и вмещающих пород.

2. Физическое опробование по всем основным разновидностям руд и вмещающих пород на определение по мере необходимости физико-механических и теплофизических свойств, таких, как объемный и удельный вес, относительная, абсолютная и эффективная пористость, относительная, абсолютная и эффективная проницаемость, прочность на сжатие, изгиб, растяжение, теплоемкость, теплопроводность и другие свойства. Размер проб для физических испытаний должен быть 15–20 см по длине керна при диаметре его не менее 75 мм. Количество проб по тем или иным разновидностям руд и пород должно быть достаточным для получения характеристики физических свойств. Для достоверности средних характеристик необходимо не менее 20 определений (Крейтер, 1961).

3. Минералого-петрографическое опробование по всем основным разновидностям серных руд и вмещающих пород путем отбора и изучения их образцов и шлифов.

4. Технологическое опробование для ПВС подразделяется на лабораторное и опытно-промышленное. В период предварительной, а иногда и детальной разведки для ПВС возможно проведение только лабораторных исследований выплавляемости серы из руд горячей водой в автоклаве. Для этого необходимо отобрать и исследовать от каждой из основных разновидностей серных руд не менее 20 проб керна длиной 15 см и диаметром не менее 75 мм. Основным требованием к количеству, характеру и размерам проб должно быть обеспечение их представительности. Перед строительством крупного предприятия ПВС или в процессе проведения детальной разведки для ПВС (особенно при сложных геотехнологических условиях, недостаточно выявляемых лабораторным путем) на месторождении осуществляются опытно-промышленные испытания выплавляемости руд и технологического режима на опытной установке ПВС.

На основе химического, физического, минералого-петрографического и технологического опробований и особенно по выплавляемости серы из руд должны быть выделены и геометризованы разновидности серных руд.

В результате гидрогеологического изучения месторождений при разведке для ПВС необходимо по методике, изложенной выше (см. описание стадий работ), установить следующее: источники питания и области разгрузки подземных вод, их направление и скорости движения, химический, газовый состав и температуру; число, состав, мощности, условия залегания и дебиты водоносных горизонтов, их статистические уровни и пьезометрические напоры, гидравлическую связь одного горизонта с другим и поверхностными водотоками; фильтрационные свойства серных руд и вмещающих пород, их водопроницаемость и водоотдачу, коэффициенты фильтрации, гидро- и пьезопроводимость; профиль водоприемности, удельные водопоглощения, дебит и их изменения от давления по всем разведочным пересечениям серной залежи; степень и характер изменчивости основных гидрогеологических параметров по площади и в разрезе месторождения; влияние структурно-геологических особенностей серной залежи и ее вторичных преобразований на гидрогеологические условия водоносных горизонтов; распространение и характер покрывающих и подстилающих серную залежь пород как водоупоров; изменения гидродинамических условий залежи при ПВС (в период эксплуатационной разведки) и влияние подземной выплавки на систему осушения карьеров месторождения и поверхностные водотоки; радиус влияния скважин и эффективность применения методов искусственного улучшения фильтрационных свойств руд; источники хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения, а также перспективные коллекторы для захоронения промышленных стоков.

Рекомендуемый при разведке для ПВС комплекс видов геофизического каротажа скважин позволяет уточнить и расширить необходимые данные о гидрогеологических условиях и литологическом разрезе пород дешевыми массовыми замерами. Расходомерия является прямым количественным способом получения данных о фильтрационных свойствах пород по их разрезу. Резистивиметрия и термометрия используются для изучения минерализации и температуры подземных вод, полуколичественной оценки фильтрационных свойств пород в разрезе. Электрометрия (методы КС, ПС) и радиометрия (методы ГК, ГГК) служат косвенными способами оценки водоносности пород, характеристики призабойной зоны скважин и дифференциации разреза горных пород. Кавернометрия и инклинометрия характеризуют состояния ствола скважин и необходимы для учета влияния его геометрии на результаты каротажа вышеперечисленными методами. Рекомендованный комплекс видов геофизического каротажа скважин проводится по общепринятой методике.

Учитывая возрастание глубины поисков и разведки серных залежей и в связи с этим необходимость увеличения разведочной информации для ПВС, следует совершенствовать методику геолого-гидрогеологических исследований и повышать эффективность разведочных работ. Основными путями для этого являются: широкое применение геофизических и геохимических методов для целей расшифровки морфологии, оконтуривания

и скважинного опробования серных залежей, разработка экспрессных способов и методов гидрогеологического опробования скважин, непрерывный охват комплексом геофизических и гидрогеологических исследований всех без исключения скважин, использование математических методов анализа полученной информации с применением машинной обработки данных на ЭВМ.

#### Литература

- Аренс В.Ж., Степанов В.И. Некоторые геологические вопросы разработки серных месторождений методом ПВС. – Труды ГИГХСа, вып. 19, 1969.
- Аренс В.Ж., Полкунов В.Ф., Харламов О.Д., Курицына Л.И., Бевза Ю.В. Подготовка месторождений самородной серы к эксплуатации методом подземной выплавки (методическое пособие). Изд. ГИГХС, 1970.
- Аренс В.Ж., Зыков В.А., Иванников И.А., Реутский В.Ф., Харламов О.Д., Шпак Д.Н., Шостак А.Г. Опыт подземной выплавки серы на Язовском месторождении. Киев, Изд. УкрНИИТИ, 1971.
- Инструкция по применению классификации запасов к месторождениям самородной серы. М., Госгеолтехиздат, 1961.
- Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. М., Госгеолтехиздат, 1961.
- Соколов А.С. Самородная сера. – В кн.: Требования к содержанию и результатам геологоразведочных работ по этапам и стадиям, ч. II. М., "Недра", 1967.
- Степанов В.И. Геологические перспективы подземной выплавки серы (ПВС) в Советском Союзе. – В кн.: Промышленность горнохимического сырья и природных солей. М., Изд. НИИТЭХИМ, вып. 3, 1969.
- Степанов В.И. Основные положения методики геологоразведочных и гидрогеологических работ по обоснованию участков для опытов подземной выплавки серы (ПВС). – В кн.: Промышленность горнохимического сырья и природных солей. М., Изд. НИИТЭХИМ, вып. 2, 1970.

## НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕНЕЗИСА МЕСТОРОЖДЕНИЙ САМОРОДНОЙ СЕРЫ

В центре внимания исследователей месторождений серы находятся вопросы, представляющие интерес и для геологов, изучающих концентрации металлов, приуроченные к осадочным породам. Один из таких вопросов — разграничение сингенетических и эпигенетических месторождений.

До середины 50-х годов большинство исследователей рассматривало месторождения серы, не обнаруживающие связи с вулканизмом, как сингенетические, нормально-осадочные образования. Представления А.С. Уклонского (1940) об их наложенном, эпигенетическом характере не пользовались в то время широким признанием. Лишь с середины 50-х годов после работ А.С. Соколова (1956, 1958), А.И. Отрешко (1960) и М.В. Иванова (1957) эти представления получили фундаментальное обоснование и широкое распространение. В настоящее время они разделяются подавляющим большинством исследователей и широко используются в практике геологоразведочных работ. Однако высказывания М.В. Иванова, сделавшего попытку обосновать сингенетическое происхождение некоторых месторождений самородной серы, показывают, что гипотезу сингенеза нельзя считать полностью оставленной и что выяснение генезиса каждого конкретного месторождения самородной серы продолжает оставаться актуальной задачей.

Весьма сходную эволюцию претерпели за последние три десятилетия представления о генезисе некоторых рудных месторождений, приуроченных к осадочным породам. Еще в начале 50-х годов большинство из них (руды Fe, Mn, Se, V, Ge, U и т.д.) априори считались осадочными. Лишь после работ А.И. Германова (1953), А.А. Смирнова и А.В. Щербачева (1957), В.Н. Холодова и других (1961), А.И. Перельмана (1961), Е.А. Головина (1965) и многих других постепенно оформились представления о наложенном, эпигенетическом происхождении многих месторождений. В настоящее время эти представления широко используются для целей прогноза и поисков. Вместе с тем обособилась группа месторождений металлов (большинство руд железа и марганца, многие концентрации и некоторые месторождения ванадия, урана, молибдена и другие), которые и сейчас почти всеми исследователями признаются осадочными.

Возникает, следовательно, вопрос о методах и критериях разграничения сингенетических и эпигенетических месторождений полезных ископаемых, приуроченных к осадочным породам, важный как для геологов, изучающих концентрации металлов, так и для геологов, занимающихся серой. С точки зрения литолога эту задачу можно сформулировать как разработку методов и критериев разграничения первичных и вторичных (наложенных) новообразований осадочной породы.

При решении этой задачи возможны разные пути. Так, можно, основываясь на данных точных наук (химии, физико-химии, термодинамики и т.д.), обсуждать реальность тех или иных генетических схем. Именно

таким путем идет М.В. Иванов, доказывая правомерность сингенетической гипотезы серообразования. Однако на этом пути могут быть получены лишь возможные схемы минералообразования. Задача же заключается в том, чтобы выяснить механизм формирования конкретного минерального парагенезиса, т.е. как было сформировано данное минеральное новообразование. Здесь более важны сбор и анализ конкретных геологических (минералогических, структурных, гидрогеологических и других) данных.

В некоторых частных случаях задача решается элементарно. Так, жильная (секущая) морфология новообразования с несомненностью определяет его наложенную природу. Не менее очевидным оказывается решение, когда с помощью картирования устанавливается связь оруденения с наложенной (постседиментационной) тектоникой. В более сложных случаях используются другие приемы.

Очевидно, что решение задачи в общем случае может быть получено при сопоставлении распределения изучаемого новообразования с фациальными изменениями вмещающей его породы, определяемым и по заведомо первичным признакам (текстурным, структурным, палеонтологическим и др.). Отсутствие фациального контроля в распространении рассматриваемого аутигенного минерала (или минерального парагенезиса), разные порядки градиентов фациальных изменений и изменений содержания полезного компонента (например, серы) заставляет предполагать наложенный, эпигенетический характер последнего.

Решение задачи еще более определено, когда рассматриваемые вторичные минералы образуют по площади или в разрезе парагенетический ряд (эпигенетическую зональность), картирование которого обнаруживает его секущие соотношения с фациальной зональностью.

Однако определение эпигенетической природы минерального парагенезиса (в частном случае — полезного ископаемого) еще не решает всех генетических вопросов. Действительно, констатировав эпигенетичность минералообразований по отношению к данной породе (фации), мы не определяем еще масштабов перемещения вещества. Возникает вопрос о масштабах миграции минералообразующего агента и его источника. Решение этого вопроса имеет особо важное значение для понимания генезиса месторождений нефти, газа и целой группы металлических и неметаллических полезных ископаемых. Однако единого мнения по этому вопросу еще нет.

Решая задачу теоретически, можно наметить три варианта генезиса минералообразующих растворов.

1. Седиментационный, связанный с перемещением вещества внутри осадочной толщи, обусловленном отжиманием седиментационных вод.
2. Инфильтрационный, связанный с проникновением в осадочные толщи подземных вод, сформированных на поверхности земли.
3. Эндогенный, связанный с поступлением в осадочные толщи растворов (жидких и газообразных) из более глубоких геосфер.

Эти варианты, порознь или в сочетании друг с другом, обычно и привлекаются для конструирования возможных схем образования месторождений углеводородов, серы, целестина, полиметаллов, ванадия, селена и т.д. Однако задача заключается не в том, чтобы наметить, как

могло образоваться месторождение, а в том, чтобы установить действительные условия его образования. Очевидно, и в этом случае решающее значение имеют геологические данные.

Детальное картирование эпигенетических новообразований в пределах всей осадочной толщи может дать материал для суждения о путях миграции минералообразующих растворов, а установление последовательности минералообразования позволяет выяснить особенности их химического состава и его эволюции. Такое картирование было проведено в некоторых районах Западного Узбекистана (Головин, Легошин, 1970). При этом в меловых отложениях были обнаружены скопления эпигенетических новообразований, представленные кварцем (халцедоном), каолинитом, кальцитом, доломитом, пиритом, жидкими и твердыми углеводородами и т.д. Они прослеживаются во всех горизонтах мелового разреза от турона до маастрихта, нередко имеют столообразную форму и корнями уходят в отложения палеозойского фундамента. Температура гомогенизации газовой-жидких включений в некоторых новообразованных минералах достигает 200<sup>o</sup>C. Проявления жидких углеводородов оказываются наиболее поздними и венчают процесс минералообразования, а не предшествуют ему, как считалось ранее.

В пределах Тянь-Шаня известны и другие проявления эпигенетических новообразований, прослеженные из отложений складчатого фундамента в породы осадочного чехла (свинцовое месторождение Акшийряк, флюоритовое месторождение Красные Холмы и др.). Сходные образования известны и вне связи с породами фундамента (полиметаллические месторождения Иокунж, Дарайсо, Санги-Савз и т.д., целестиновые месторождения Чалташ и Гулисай с полиметаллами и флюоритом и т.д.). На многих из них установлены проявления жидких и газообразных углеводородов.

Обычно подобные образования относят к гидротермальным и в соответствии с традиционной концепцией связывают с теми или иными проявлениями магматизма. Однако применительно к покровным формациям Тянь-Шаня такие взгляды не выдерживают критики, так как проявления альпийского магматизма здесь ничтожны, резко локальны и не обнаруживают ни пространственной, ни временной связи с упомянутыми эпигенетическими новообразованиями. С чем связано формирование последних — с перераспределением вещества в пределах только осадочной толщи или с его поступлением из более глубоких геосфер — должны показать дальнейшие исследования.

Картирование эпигенетических новообразований осадочных толщ — большая и трудоемкая работа, требующая усилий большого коллектива геологов, но без этого мы не получим материалов, необходимых для достоверного решения важнейших генетических вопросов, а следовательно, и для разработки научно обоснованных методов прогноза и поисков ряда полезных ископаемых, в том числе и самородной серы.

Такая постановка задачи ставит на повестку дня еще один вопрос: о пространственной, временной и в конечном счете генетической связи обширной группы эпигенетических полезных ископаемых, приуроченных к осадочным породам. Этот вопрос в общем виде был давно поставлен А.С. Уклонским (1940), однако до сих пор делается в этом направлении недостаточно, что связано, в частности, с раздробленностью геологи-

ческих сил, с узко ведомственным характером исследований. Так, например, в работах М.С. Лазарева по Гаурдакскому месторождению рассматривается генезис только серных руд, для объяснения образования которых в какой-то степени привлекались проявления углеводородов. А между тем на Гаурдаке помимо самородной серы и проявлений углеводородов в тех же юрских отложениях известны жильные проявления флюорита, сфалерита, барита, целестина и других эпигенетических минералов. Собранные предварительные данные позволяют предполагать длительный и сложный процесс минералообразования, начавшийся, по-видимому, с формирования флюорит-баритовых жил (температура декрипитации и гомогенизации газово-жидких включений во флюорите более  $250^{\circ}\text{C}$ ) и закончившийся отложением самородной серы. Гаурдакская антиклиналь, следовательно, может быть определена как длительно существующий очаг разгрузки растворов меняющегося состава и температуры. Происхождение собственно серообразующих растворов в этой связи может получить существенно иную интерпретацию.

Таким образом, коренные вопросы генезиса месторождений самородной серы тесно переплетаются с вопросами генезиса не только месторождений нефти и газа, но и других полезных ископаемых, приуроченных к осадочным породам (флюорита, целестина, боратов, полиметаллов и т.д.). Успехи в этом направлении могут быть достигнуты лишь коллективным трудом геологов разных специальностей и ведомств. Организация подобных комплексных исследований — актуальная задача сегодняшнего дня.

#### Литература

- Германов А.И. О возможном участии подземных вод в гидротермальном рудообразовании. — Изв. АН СССР, серия геол., 1953, №6.
- Головин Е.А. О двух группах экзогенных процессов и урановых месторождений. — Литология и полезные ископаемые, 1965, №2.
- Головин Е.А., Легошин В.П. Об эпигенетических (наложенных) процессах в осадочных породах. — В кн.: Состояние и задачи советской литологии, т. I. М., "Наука", 1970.
- Иванов М.В. Участие микроорганизмов в образовании отложений серы в Шорсу. — Микробиология, вып. 26, 1957.
- Отрешко А.И. Геология и условия образования серных месторождений Средневожского бассейна. — Труды ГИГХСа, вып. 6, 1960.
- Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). М., "Высшая школа", 1961.
- Смирнов А.А., Шербаков А.В. Методические указания по интерпретации и проверке радиогидрогеологических аномалий с целью поисков урановых месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1957.
- Соколов А.С. Геологические закономерности размещения серных месторождений. — Бюлл. МОИП, отд. геол., 31, вып. 3, 1956.
- Соколов А.С. Основные закономерности геологического строения и размещения осадочных месторождений самородной серы. — Сов. геол., 1958, №5.
- Уклонский А.С. Парагенезис серы и нефти. Ташкент, Изд. Узбекского филиала АН СССР, 1940.
- Холодов В.Н., Лисицын А.К., Комарова Г.В., Кондратьева И.А. Об эпигенетической зональности уранового оруденения в нефтеносных карбонатных породах. — Изв. АН СССР, серия геол., 1961, №11.

## ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА СЕРОВОДОРОДА В ЗАЛЕЖАХ ВЫСОКОСЕРНИСТЫХ ГАЗОВ

В последние годы сероводород в составе природных газов стал рассматриваться как полезное ископаемое и соответственно резко возросла актуальность исследований по геологии, геохимии и разработке залежей сернистых газов. Широко распространенные представления о преимущественно гипергенном происхождении сероводорода в осадочной толще не подтвердились фактическим материалом. Залежи газов с высоким содержанием  $H_2S$  обнаружены главным образом на больших глубинах, в зоне катагенеза. Именно в этих условиях созданы благоприятные условия для накопления и сохранения сероводорода в газовой фазе.

В работе "Опыт описательной минералогии" В.И. Вернадский допускал, что образование сероводорода может происходить вследствие метаморфизма пород. А.Н. Саханов и А.Ф. Добрянский появление сероводорода в нефтях рассматривали как следствие реакций типа каталитического крекинга. Н.Б. Вассоевич указывал, что одним из основных процессов при погружении пород на большие глубины является потеря микронептью аксессуарных элементов (S, N, O), а также ее метанизация. Отсюда неизбежен переход серы сероорганических соединений в сероводород при высоких температурах. В.А. Соколов рассматривал  $H_2S$  как характерный продукт термokatалитической зоны. Таким образом, представления о возможном катагенном генезисе сероводорода соответствуют мнению достаточно авторитетных исследователей, однако в большинстве случаев они игнорировались.

В настоящее время материал по распространению  $H_2S$  в породах, подземных водах, нефтях и газах позволяет сделать достаточно обоснованное заключение, что наряду с сероводородом гипергенного происхождения в основной части разреза осадочной толщи нефтегазоносных бассейнов присутствует сероводород катагенного происхождения. Его образование связано с процессами осернения органического вещества в сульфатно-карбонатных комплексах с последующим образованием  $H_2S$  в результате реакций взаимодействия элементарной серы с органическим веществом и разложения сероорганических соединений битумов и нефтей при погружении пород на большие глубины. Высокие температуры и давление, кислая реакция подземных вод, особенно характерная для древних отложений, отсутствие микробиологической деятельности — все эти условия создают благоприятные возможности для накопления и сохранения сероводорода в зоне катагенеза.

Эти положения подтверждаются следующими доказательствами.

1. В однотипных литолого-фациальных комплексах концентрация  $H_2S$  в водах и природных газах увеличивается с глубиной; в этом отношении, пожалуй, нельзя найти ни одного исключения.

2. В зоне современных окислительно-восстановительных процессов концентрация  $H_2S$  в природных и попутных газах далеко не достигает

тех значений, которые наблюдаются в глубоких горизонтах, где отсутствует микробиологическая деятельность.

3. Во всех исследованных месторождениях Волго-Уральской области не зафиксировано увеличения концентраций  $H_2S$  по направлению к водо-нефтяному контакту, где следовало бы наблюдать усиление процессов восстановления сульфатов и продуцирования сероводорода.

4. С увеличением глубины залегания отложений намечается тенденция к облегчению нефтей, уменьшению содержания в них серы, в то же время увеличивается концентрация сероводорода. Нефти, залегающие в верхних горизонтах, содержат менее термостабильные сероорганические соединения (выделяют  $H_2S$  при более низких температурах), чем нефти глубоких горизонтов.

Органическое вещество осадочных пород является мощным источником восстановленных соединений серы. Осадочные породы могут дать самые высокие концентрации сероводорода, которые встречаются в природе. Так, содержание  $H_2S$  в подземных водах газовых месторождений Западной Канады достигает 50 000 мг/л, концентрация  $H_2S$  в попутных газах некоторых нефтяных месторождений Среднего Востока и бассейна Биг-Хорн (штат Вайоминг, США) — 40–63, а в природных газах Западной Канады и Примексиканской впадины — 50–80 и даже 97 объемн.%. Эти концентрации намного выше тех максимальных значений, которые наблюдаются в областях современной вулканической деятельности. При миграции глубинного сероводорода в зону гипергенеза последний может стать наряду с углеводородными газами источником самородной серы.

Представления о преимущественном накоплении в глубоких горизонтах осадочной толщи катагенного сероводорода положено в основу прогнозирования распространения залежей высокосернистых газов. При прогнозировании следует учитывать литолого-фациальные особенности пород, палеогеологическую историю развития территории и современные термодинамические условия возможно продуктивных комплексов. В частности, такой подход подтвердился для территории Северного Прикаспия, где подсольевые отложения оценивались как перспективные для открытия залежей газа с высоким содержанием  $H_2S$ . Получение мощного газодляночного фонтана на Ждановской площади (Саратовская область) в конце 1970 г. значительно укрепило уверенность, что "большой сероводород" Прикаспийской впадины станет реальной основой для создания на этой территории мощной базы добычи газовой серы.

Если в отношении крупных месторождений природного газа с высоким содержанием сероводорода положение более или менее ясно, то серьезную проблему представляет разработка небольших месторождений, где концентрация  $H_2S$  относительно невелика. В Советском Союзе сжигается в факелах 10–12 млрд. м<sup>3</sup> попутного газа, причем основная часть его уничтожается только из-за присутствия сероводорода. Это примерно 5% годовой добычи газа и он содержит около 5% годовой добычи серы по Союзу. Многие мелкие месторождения природного газа Волго-Уральской области и, по-видимому, других районов законсервированы.

В то же время имеются примеры, когда за рубежом добывают серу из средних и мелких месторождений. В США созданы специальные установки с производительностью всего 9–13 т серы в день, которые работают на газе, где концентрация  $H_2S$  всего 2–5%. При серийном производстве таких установок их использование может стать экономически выгодным.

Весьма многообещающим является непосредственное использование сероводорода при очистке сточных и промышленных вод, а также при добыче некоторых металлов из вод и пород. Во многих случаях  $H_2S$  может быть более удобным осадительным агентом, чем другие реагенты. Кроме того, отпадает необходимость в окислении  $H_2S$  до элементарной серы, а затем до серной кислоты. В Техасе (США) одна из фирм предлагает потребителям жидкий сероводород по цене 25 долл. за тонну. Для хранения и перевозки жидкого  $H_2S$  создано специальное оборудование. Интересно, что за несколько лет работы не было ни одного несчастного случая.

Большие перспективы должны иметь исследования по сорбционным свойствам пород и вод по отношению к сероводороду. Для мелких месторождений газа, где промышленная очистка будет экономически невыгодной, возможно, более эффективно было бы очищать газы от сероводорода путем перепуска его в верхние терригенные горизонты, где присутствуют щелочные воды. В случае, если концентрация  $H_2S$  относительно небольшая, можно ожидать снижения ее до промышленных кондиций. По сути дела предлагается на природных объектах моделировать те геохимические процессы, которые ведут к очистке углеводородных газов от сероводорода.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ

В последние годы открыты многочисленные месторождения сероводородсодержащих газов, среди которых имеются весьма крупные по запасам. Использование газов такого состава в качестве топлива и химического сырья требует специальной их очистки от ядовитых сероорганических соединений, связанной с высокими затратами, существенно влияющими на увеличение стоимости газов. Это обстоятельство привело к разработке комплексных методов переработки с использованием кислых газов для получения элементарной серы, потребность в которой на мировом рынке велика.

Опыт газовой промышленности капиталистических стран показал, что реализация серы, полученной из газов, в значительной мере компенсирует высокие затраты на очистку газов, причем сера, получаемая из очищаемых газов, высококачественная (чистотой 99,9%) и дешевая (почти в три раза дешевле серы, получаемой на горно-обогатительных комбинатах).

В Советском Союзе выявлены крупные запасы серы в газовых месторождениях, сопоставимые с запасами самородной серы. Запланировано и ведется строительство заводов газовой серы в Средней Азии (Мубарек) и на юго-востоке европейской части СССР (Оренбург). Дальнейшее развитие способа получения серы из газов связано с открытием новых месторождений. В связи с этим перед геологами поставлены задачи познания условий формирования и закономерностей размещения месторождений сероводородсодержащих газов, которые должны явиться основой прогнозирования газо- и сероносности.

В плане решения этих задач авторы, обобщив материалы по сероводородсодержащим газовым месторождениям Советского Союза и зарубежных стран, предприняли сравнительный анализ состава газов и изучение тектонических, литолого-фациальных, гидрогеологических и геохимических особенностей месторождений в различных районах их распространения. Основными объектами исследования явились месторождения, выявленные в Волгоградской, Саратовской, Куйбышевской, Оренбургской, Пермской, Свердловской областях и на территории Средней Азии, в районах Восточной Туркмении, Узбекской, Таджикской и Киргизской ССР.

Исследования показали, что залежи сероводородсодержащих газов тяготеют пространственно к нефтегазоносным бассейнам, сложенным морскими осадками аридных формаций, и приурочены регионально к карбонатным коллекторам. Скопления сероводородсодержащих газов распространены в разновозрастных отложениях, однако основные запасы сосредоточены в девонской и каменноугольной системах на древних платформах (Канада, США, юго-восток европейской части СССР) и в верхнеюрских образованиях на молодых платформах (Средняя Азия, Франция).

Связь сероводородсодержащих газов с карбонатными осадками и региональная приуроченность их к разновозрастным стратиграфическим комплексам в пределах однотипных платформенных бассейнов на различных континентах свидетельствуют об осадочном формировании месторождений этих газов.

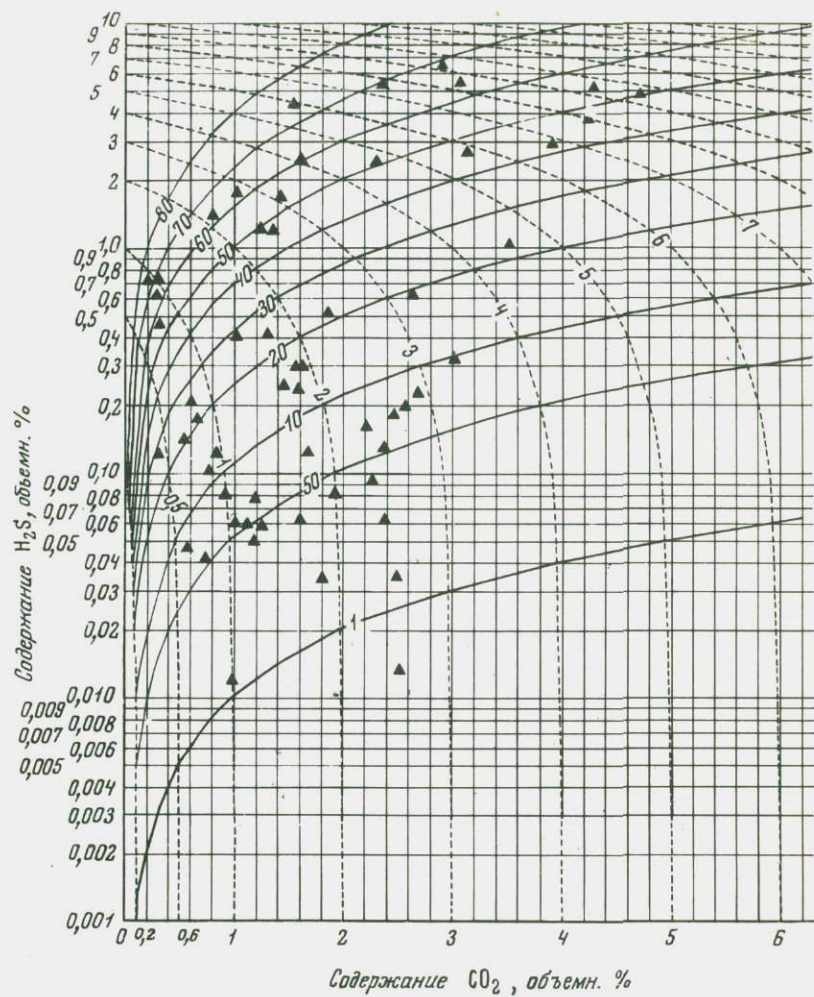
Сероводородсодержащие газы представляют собой смеси кислых и углеводородных газов, нередко существенно различающихся по содержанию и соотношению составляющих их компонентов.

Содержание сероводорода колеблется от сотых и тысячных долей процента до нескольких, реже до нескольких десятков процентов. В месторождениях Советского Союза содержание сероводорода, как правило, не превышает 5–8 объемн. %. Из мировой практики известны месторождения природных газов, в которых содержание сероводорода достигает более 15–30 объемн. % (Пинчер Крик, Ватертон и другие в Канаде; Лак во Франции; Элк, Уорленд в США; Бандар Шахпур в Иране и т.п.).

В составе газов наряду с сероводородом непременно присутствует углекислый газ, концентрация которого достигает 1–4%, реже 10% и выше. В углеводородных газах, лишенных сероводорода, подобные концентрации  $\text{CO}_2$  встречаются редко, и обычное его содержание не превышает 0,1–0,6%. Соотношение сероводорода и углекислого газа колеблется от 1:70 до 4:1. Однако рост содержания сероводорода сопровождается увеличением его концентрации по отношению к сумме кислых компонентов (фиг. 1). Эта закономерность, отчетливо выраженная при содержании сероводорода более 0,05–0,1%, приводит к тому, что в газовых смесях, содержащих свыше 5% кислых газов, на долю сероводорода приходится повсеместно более 50–70% от суммы кислых компонентов (табл. 1).

При общем непостоянстве содержания кислых компонентов в природных газах в составе кислых газов устанавливается определенная концентрация сероводорода, свойственная конкретным месторождениям и однородным в геолого-геохимическом отношении регионам (фиг. 2). Это обстоятельство, определяющее геолого-экономическую целесообразность и технологию производства серы из природных газов, послужило основой для разработки классификации промышленных сероводородсодержащих газовых месторождений исходя из абсолютного содержания сероводорода и степени обогащения им кислых газов (Лондон, 1970). Технология извлечения серы из очищаемых кислых газов также зависит от степени обогащения кислой фракции сероводородом. В качестве нижнего предела промышленного использования очищаемых газов для производства серы установлено 15–17% обогащения кислых газов сероводородом (II класс, табл. 1). Наиболее рентабельна добыча серы из обогащенных концентрированных и высококонцентрированных сероводородсодержащих газов (III–V классы); при меньших концентрациях сероводорода целесообразность использования газов для получения серы зависит прежде всего от суммарных запасов газа (Ильина, Клямер, 1969).

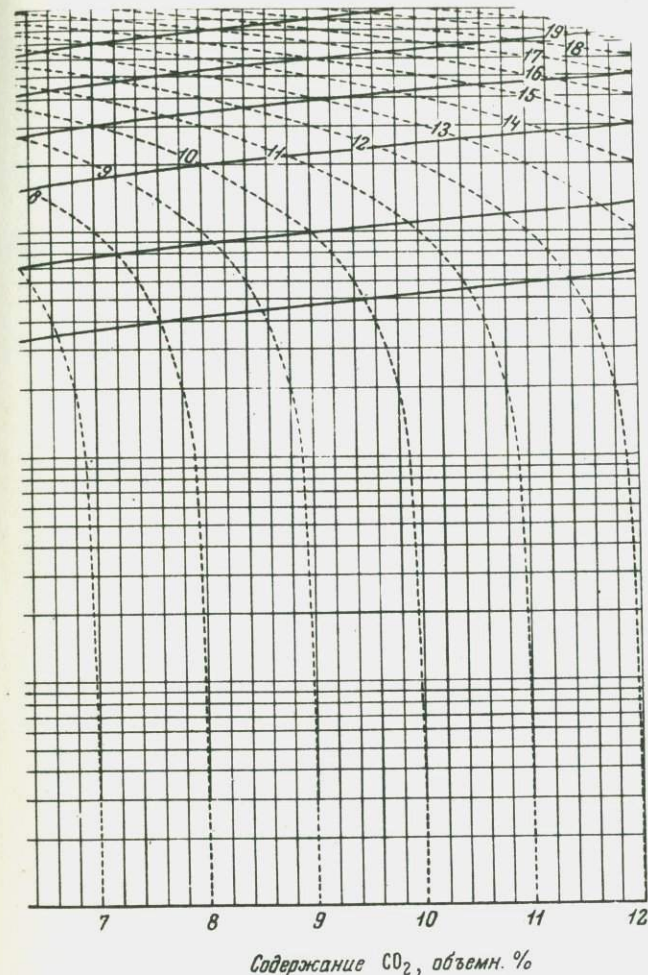
Сероводородсодержащие газы сходны по составу углеводородных фракций с природными газами, лишенными сероводорода, и так же как последние различаются по содержанию и соотношению метана и его гомологов.



Фиг. 1. Соотношение концентрации сероводорода и углекислого газа в природных горючих газах

Вместе с тем выявлена общая для всех природных газов количественная зависимость между концентрациями кислых компонентов, метана и суммы тяжелых углеводородов. Эта зависимость показывает, что рост концентрации кислых газов происходит по мере снижения концентрации метана, но при прочих равных условиях наибольшее накопление кислых компонентов возможно в газовых смесях со сравнительно меньшими концентрациями тяжелых углеводородов.

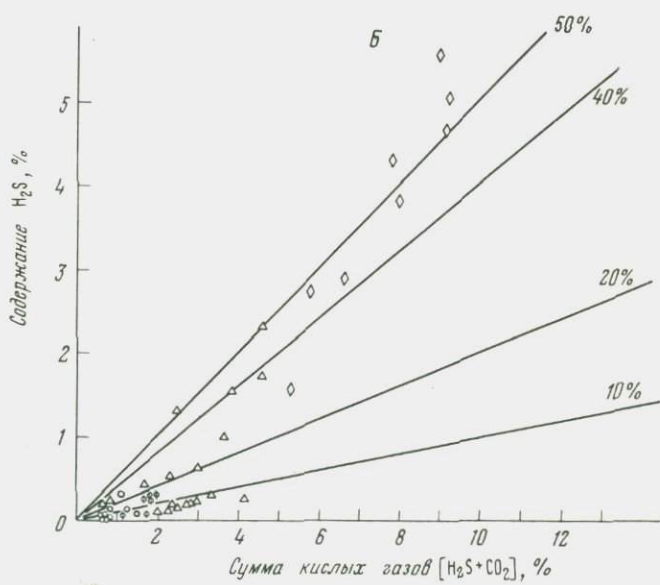
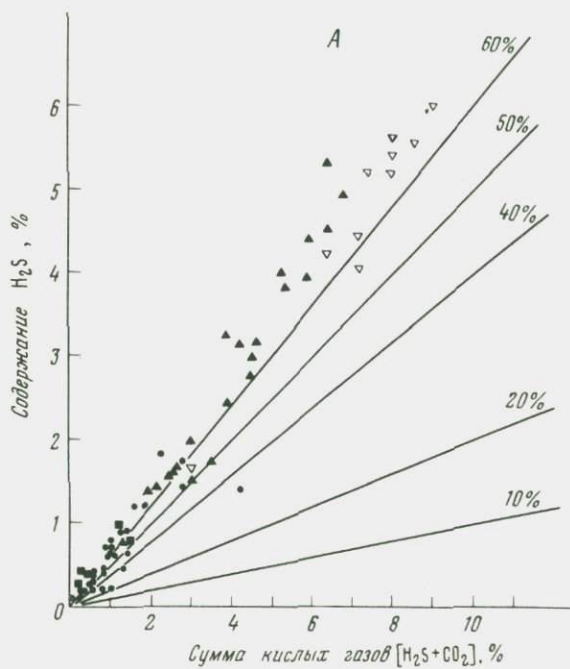
Выявленные зависимости между составляющими кислой и углеводородных фракций имеют важное значение для объяснения специфических особенностей состава и закономерностей его изменения в месторождениях

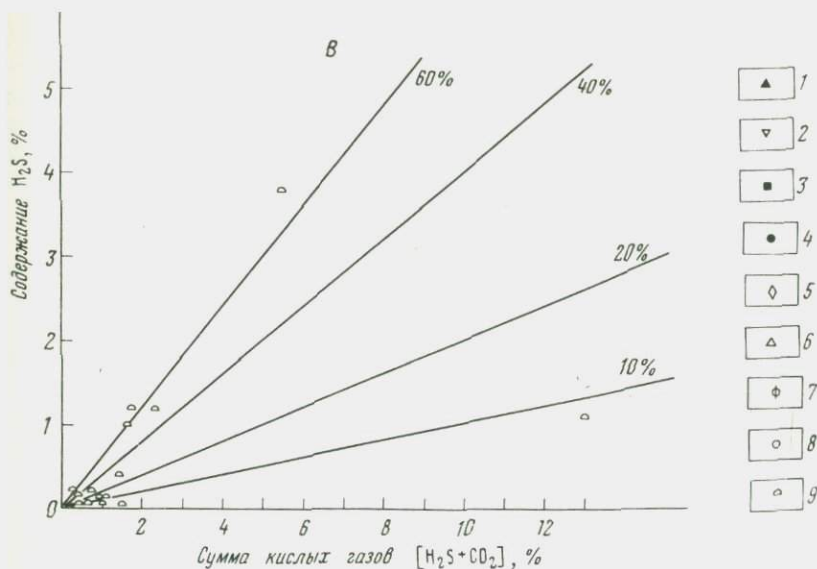


1 - сумма кислых газов; 2 - степень обогащения кислых газов сероводородом; 3 - фигуративные точки месторождений

сероводородсодержащих газов. Так, в газовых месторождениях Восточной Туркмении и Западного Узбекистана проявляется общая закономерность увеличения суммы кислых газов по мере увеличения содержания сероводорода и снижения концентрации тяжелых углеводородов. В области высоких концентраций кислых газов (свыше 4,5-9%) рост содержания сероводорода, происходящий при относительно постоянном содержании тяжелых углеводородов (2,7-1,6%), сопровождается снижением концентрации метана.

В месторождениях Волго-Уральской области и Предуралья прогиба сосредоточены жирные газы, содержащие свыше 6-10% тяжелых





Фиг. 2. Соотношение концентраций сероводорода и суммы кислых газов в месторождениях различных регионов

А – месторождения Волго–Уральской области и Предуралья: 1 – Оренбургского района, 2 – Саратовско–Исимовской зоны, 3 – Большекинельского вала, 4 – Кинельско–Самаркинской зоны; Б – месторождения Восточной Туркмении и Западного Узбекистана: 5 – Денгизкульского вала, 6 – Учкыр–Гугуртлинского района, 7 – Мубарекского района, 8 – Газлинского района; В – месторождения Ферганской впадины и Южно–Таджикской нефтегазоносной области (9)

углеводородов. Кислые газы, концентрация которых в смесях углеводородов колеблется от 0,3 до 10–12%, повсеместно состоят более, чем на 40–70% из сероводорода (см. фиг. 2). В этом случае рост содержания кислых газов, обусловленный увеличением содержания сероводорода, происходит по мере снижения концентрации метана.

Выявленным зависимостям подчиняются также сероводородсодержащие газы, распространенные в месторождениях зарубежных стран (месторождение Лак).

Таким образом, проведенный анализ показывает, что сероводородсодержащие газы, распространенные в осадочных месторождениях, весьма сходны по составу и отличаются лишь колебаниями в количественных концентрациях составляющих кислых и углеводородных компонентов. Эти данные и общие количественные зависимости в распределении компонентов, контролируемые закономерности изменения состава газов в различных районах их распространения, дают основание полагать, что механизм формирования состава сероводородсодержащих газов единый для всех осадочных месторождений.

Таблица 1

Содержание сероводорода в природных газах с разными концентрациями кислых газов

Класс	Промышленная категория газов по относительному содержанию сероводорода во фракции кислых газов	$\frac{H_2S}{\Sigma_K} \cdot 100\%$	Содержание сероводорода в природных газах при различных суммарных концентрациях кислых газов ( $\Sigma_K$ ), объемн. %							
			$\Sigma_K \leq 0,5$	$\Sigma_K > 0,5-1$	$\Sigma_K > 1-2$	$\Sigma_K > 2-3$	$\Sigma_K > 3-4$	$\Sigma_K > 4-5$	$\Sigma_K > 5-6$	$\Sigma_K > 6-7$
I	Обедненные	< 10-5	0,5	0,1	0,2	0,3	-	-	-	-
II	Малоконцентрированные	> 10-20	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,3-0,6	0,4-0,8	-	-	-
III	Обогащенные	> 20-40	0,1-0,20	0,2-0,4	0,4-0,8	0,6-1,2	0,8-1,6	1-2	-	-
IV	Концентрированные	> 40-50	0,2-0,25	0,4-0,5	0,8-1,0	1,2-1,5	1,6-2,0	2-2,5	2,5-3	3-3,5
V	Высококонтцентрированные	> 50	0,25-0,3	0,5-0,7	1-1,4	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4,5

Рассмотрение взаимосвязи в распределении количественных концентраций кислой и углеводородных фракций показывает, что в газовых смесях, сходных по составу и соотношению углеводородов, изменение концентраций последних, происходящее по мере роста содержания кислых компонентов, по существу отражает лишь уменьшение относительных концентраций углеводородных фракций по отношению к сумме всех составляющих газовой смеси. Это явление, наиболее сильно проявляющееся по отношению к преобладающему компоненту углеводородов, при высоком накоплении кислых газов обуславливает резкое снижение относительной концентрации метана. Следовательно, накопление кислых газов не влияет на изменение абсолютного содержания углеводородных составляющих, т.е. кислые газы концентрируются в готовой фазе углеводородных газов.

Гидрогеологические исследования, проведенные в различных нефтегазоносных бассейнах Советского Союза, показали, что пластовые воды, окружающие газовые залежи, содержат значительные количества углеводородных газов, парциальная упругость которых нередко сопоставима с парциальной упругостью этих газов в залежах (Козлов, 1959; Лондон, 1964, 1967, 1970). Очевидно, формирование скоплений углеводородных газов обусловлено выделением их из раствора на участках насыщения водной системы. Вместе с тем, в результате высокой подвижности газов, последние в процессе струйной миграции в водонасыщенных породах формируют скопления на фоне пластовых вод, обедненных углеводородами (Лондон, 1964; Савченко, 1968). В этом случае в зоне взаимодействия залежи с окружающими водами устанавливается ореольное рассеивание газов из залежи в пластовые воды (Лондон, 1964, 1967, 1970).

Совершенно иначе ведут себя кислые газы. Анализ показал, что залежи сероводородсодержащих газов повсеместно контактируют с пластовыми водами, высокообогатенными кислыми газами, в том числе и сероводородом, содержание которого в растворенном газе достигает более 1000–3000 см<sup>3</sup>/л (месторождения Оренбургской области, Таджикской депрессии и др.). При этом концентрация сероводорода, нередко более повышенная в законтурных водах, заметно снижается в направлении контура залежи. Одновременно установлено, что в пределах самой залежи газов содержание сероводорода также непостоянное и, как правило, уменьшается от водогазового контакта к повышенной присводовой части залежи (табл. 2). Наряду с этим в процессе разработки месторождения заметно возрастает содержание сероводорода в газовой залежи (табл. 3). Аналогичным образом ведет себя и углекислый газ (Карпов, Симоненко, 1960). Совокупность этих данных свидетельствует, что источником кислых газов в залежи являются пластовые воды, причем накопление сероводорода в газовой фазе происходит в результате диффузионного перераспределения газов между пластовой водой и залежью (см. табл. 2) и принудительной десорбции поглощенного водой газа при снижении пластового давления (см. табл. 3).

Для полярных газов, таких как сероводород и углекислый газ, характерна очень высокая растворимость в водных растворах электролитов,

Таблица 2

Концентрация сероводорода в различных частях залежи природных горючих газов

Месторождение	Возраст продуктивного горизонта	Номер скважины	Место отбора проб	Сероводород, %
Учкыр	I <sub>3</sub>	2	Горизонт XV-1	0,04
		11		1,14
		2	Горизонт XV-2	0,3
		11	Горизонт XV-1	1,0
Кульбешкак	I <sub>3</sub>	6	Свод, горизонт XV	0,03
		2	Приконтурная часть	0,2
		11		Свод
		5	Приконтурная часть	0,33
Памук	I <sub>3</sub>	2	Свод, горизонт XV	0,02
		11		0,04
Адамташ	I <sub>3</sub>	1	Свод, горизонт XV	0,1
		2	Северное крыло	0,18
		10	Северо-восточная периклиналь	0,17-0,19
		5		Юго-восточное крыло
		3		
Соколовогорское	C <sub>I</sub> <sup>2</sup>	3	Свод	0,009
		122	Присводовая часть	0,025
		120		0,04
Горючкинское	C <sub>I</sub> <sup>2</sup>	52	Свод	0,034
		54	Присводовая часть	0,047
Линевское	C <sub>I</sub> <sup>2</sup>	4	Приконтурная часть	0,097
		2	Свод	0,066-0,068
		24	Приконтурная часть	0,075-0,13

Таблица 2 (окончание)

Месторождение	Возраст продуктивного горизонта	Номер скважины	Место отбора	Сероводород, %
Генеральское	$C_1^2$	7	Свод	0,047
		11	Присводовая часть	0,098
		8	Присводовая часть	0,11
Дуговское	$C_1^2$	14	Свод	0,057
		29	Присводовая часть	0,063
Старицкое	$C_1^2$	3	Свод	0,004
		8	Приконтурная часть	0,06
Городецкое	$P_2^{kr}$	7	Свод	0,8
		12	Приконтурная часть	1,2
Осиновское	$P_1^{kg}$	2	Свод	0,2
		18	Приконтурная часть	1,4
Могутовское	$P_2^{kr}$	17	Присводовая часть	0
		5	Присводовая часть	
		23	Приконтурная часть	0,2

что препятствует их переходу в свободную фазу. Таким образом, сероводород, в отличие от углеводородных газов (растворимость которых в водных растворах в десятки-сотни раз меньше), практически не способен к формированию самостоятельной газовой фазы и концентрируется в жидкой фазе пластовых вод. С другой стороны, при наличии готовой фазы углеводородов, соприкасающейся с пластовой водой, обогащенной сероводородом, в силу вымывающего действия углеводородных газов сероводород попадает в газовую фазу. Это явление наиболее сильно проявляется при перемещении углеводородов в водовмещающих толщах.

В настоящее время имеются неопровержимые доказательства образования сероводорода в осадочных породах, причем, по мнению большинства исследователей, оно связано с восстановлением сульфатов органическим веществом и нефтью. Расчеты термодинамических функций свидетельствуют об одинаковой возможности сульфатредукции чисто химическим путем и при участии бактерий. Однако экспериментально показано, что химическое восстановление сульфатов органическими веществами, в том числе нефтью и углеводородными газами, протекает лишь при высоких температурах. С другой стороны, имеются убедительные данные, свидетельствующие, что процессы микробиологической сульфатредукции широко проявляются в осадочных породах в значительном интервале

Таблица 3

Изменение содержания сероводорода в газовых залежах в процессе их разработки

Место-рождение	Номер скважины	Содержание сероводорода, г/100 м <sup>3</sup>	Место-рождение	Номер скважины	Содержание сероводорода, г/100 м <sup>3</sup>	
Соколовское	114	30,65	Луговое	14	64,05	
	114	42,37		14	81,4	
	114	60,8		12	33,27	
	47	15,7		12	58,62	
	47	73,7		Фурмановское	7	81,02
	125	42,37			7	117,3
Генеральское	125	49,76		25	47,37	
	8	24,5		25	75	
	8	157,5		25	95,4	
	8	219,3		18	66,3	
	11	77		18	109,8	
	11	140	Первомайское	1	173,7	
			1	437		

глубин их залегания (Иванов, 1964; Лондон, Мехтиева, 1962). Ведущая роль в этих процессах отводится сульфатредуцирующим бактериям, которые при благоприятных условиях способны оказывать длительное воздействие на захороненную органику и нефть.

Процессы микробиологического окисления нефти при участии сульфатредуцирующих бактерий даже при наличии благоприятных условий весьма ограничены по масштабу и проявляются лишь в зонах непосредственного взаимодействия залежей с пластовыми водами (Лондон, Мехтиева, 1962; Лондон, 1964). Образующийся при этом сероводород вследствие высокой растворимости в нефти (в 2-7 раз превышает его растворимость в водных растворах) извлекается из пластовых вод нефтью. Таким образом, микробиологическое окисление нефти не может обеспечить высокое накопление сероводорода в газовых залежах и не объясняет региональное обогащение залежей и пластовых вод сероводородом.

Наиболее существенную роль в накоплении сероводорода играют, по видимому, процессы преобразования рассеянного в осадках органического вещества. Эти процессы, регионально происходящие в иловых осадках и водовмещающих породах по мере их погружения на глубину, способствуют повсеместному обогащению пластовых вод новообразованиями и при условиях, благоприятствующих их сохранению, приводят к накоплению сероводорода и генетически связанного с ним углекислого газа в пластовых водах. В дальнейшем, в силу вымывающего действия углеводородных газов, формирующих скопления в водонасыщенных породах, обогащенных сероводородом, последний повсеместно накапливается в свободной газовой фазе.

При таком механизме формирования осадочных месторождений сероводородсодержащих газов сероводород и углекислый газ в залежи будут

находиться в строго определенном соответствии с соотношением образующихся компонентов и их растворимости в водных растворах электролитов. В этом случае в пределах тектонически обособленных зон и районов, однородных в геолого-геохимическом отношении, концентрация сероводорода в составе кислых газов будет практически постоянная. Учитывая, что растворимость сероводорода примерно в 3 раза превышает растворимость углекислого газа при прочих равных условиях, неизбежно относительное обогащение кислой фракции сероводородом (см. фиг. 2).

Однако при относительном постоянстве концентрации сероводорода в составе кислой фракции в газовых залежах в конкретных районах различные районы нередко существенно различаются по степени обогащения газов сероводородом (см. фиг. 2) и нередко характеризуются повсеместным низким содержанием сероводорода в газовых залежах (см. фиг. 2). В связи с этим важно выяснить, какие факторы контролируют размещение концентрированных сероводородсодержащих газовых месторождений.

Имеющиеся данные показывают, что процессы восстановления сульфатов получают интенсивное развитие в терригенных осадках. Однако в этом случае сероводород, легко связываясь с реакционно-активными окислами металлов, расходуется в процессе его образования (Страхов, 1963). Этим обусловлено, по-видимому, отсутствие залежей концентрированных сероводородсодержащих газов в терригенных осадках. Подтверждением этому является региональное низкое содержание сероводорода в газовых месторождениях Волгоградской и Саратовской областей, связанных с терригенными осадками бобринского горизонта нижнего карбона (см. фиг. 2, А).

В коллекторах карбонатного состава концентрация сероводорода и степень обогащения им кислой фракции заметно возрастают. Так, в районах Нижнего Поволжья в отложениях нижнего карбона в направлении увеличения карбонатности терригенных пород степень обогащения кислых газов сероводородом возрастает от 10–20% (месторождения Фурмановское, Суловское, Генеральское, Урицкое, Родионовское, Западно-Рыбушанское, Багаевское и др.), а в отложениях, представленных преимущественно карбонатными породами ( $C_1-C_2$ ), распространены газы, в которых на долю сероводорода в составе кислой фракции приходится уже свыше 30–50% (месторождения Коробковское, Степновское, Первомайское, Щербаковское).

На юго-востоке Русской платформы, где сосредоточены высококонцентрированные сероводородсодержащие газы, последние обнаруживают региональную приуроченность к известняково-доломитовым породам (месторождения Куйбышевской, Оренбургской, Пермской, Свердловской областей и Башкирской АССР). С известняково-доломитовыми образованиями связаны многочисленные месторождения высокообогащенных сероводородсодержащих газов, выявленные в Восточной Туркмении и Западном Узбекистане. Причем относительное обеднение газовых залежей сероводородом, наблюдающееся в месторождениях в повышенных частях Чарджоуской и Бухарской ступеней, находится в соответствии с увеличением терригенного материала в составе карбонатных коллекторов.

Анализ материалов по другим районам Советского Союза и зарубежных стран показал, что все известные в настоящее время залежи высоко-

концентрированных сероводородсодержащих газов связаны регионально с известняково-доломитовыми образованиями. Характерно, что региональное распространение в этих коллекторах залежей концентрированных сероводородсодержащих газов сочетается с повышенной сернистостью нефтей и битумоидов и повсеместным обогащением растворенных газов нефтей сероводородом (Радченко, 1965).

Одновременно установлено, что подземные воды в карбонатных коллекторах регионально заражены сероводородом, причем высокоминерализованные пластовые воды, сосредоточенные в известняково-доломитовых образованиях, содержат значительные количества сероводорода в растворенном газе. Совокупность этих данных дает основание предположить генетическую связь серосодержащих соединений с вмещающими карбонатными осадками и приводят к выводу, что образование осадочных месторождений высококонцентрированных сероводородсодержащих газов связано с процессами преобразования в известняково-доломитовых осадках рассеянного органического вещества.

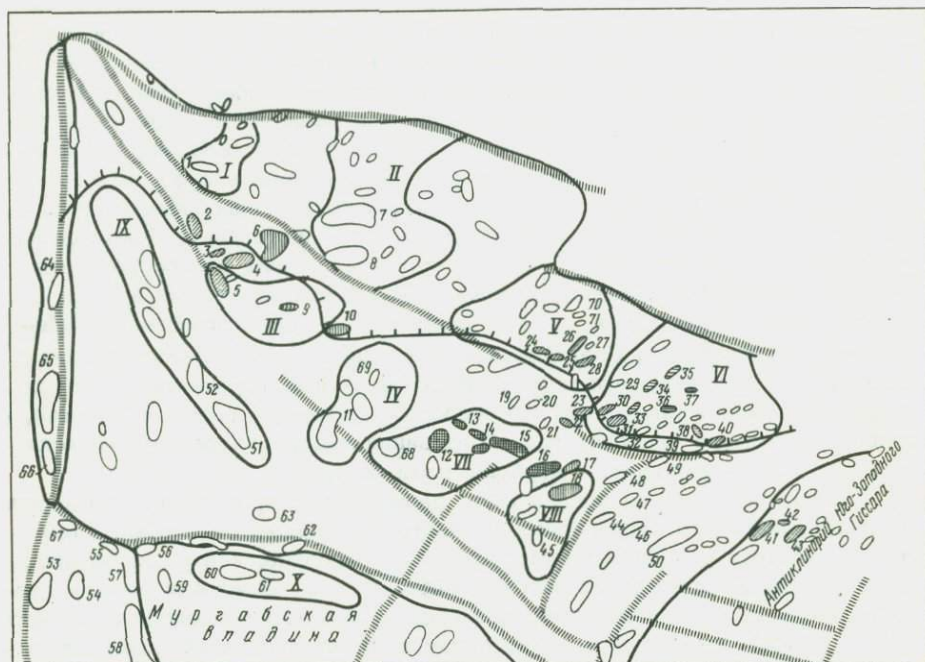
В последние годы получены новые данные, объективно свидетельствующие, что высокоминерализованные пластовые воды, регионально распространенные в известняково-доломитовых образованиях, по химическому облику весьма сходны с водами, формирующимися на поверхности в морских бассейнах (Валяшко, Власов, 1965; Жеребцова, Ролкова, 1966; Лондон, 1970). На этом основании исследователи предполагают, что в обстановке аридного морского осадконакопления создаются благоприятные условия для захоронения и сохранения в недрах бассейнов в течение длительного геологического времени рассолов, генетически связанных с морскими рассолами древних осадков. Это обстоятельство, имеющее важное значение для сохранения сероводорода (и углекислого газа), образующегося в процессе преобразования рассеянного органического вещества, по-видимому, объясняет повсеместное высокое накопление его в пластовых водах.

Рассолы, формирующиеся в солеродных бассейнах, неблагоприятны для развития органической жизни. Уже на стадии перехода доломитов в сульфатные породы наблюдается существенное обеднение пород органическими остатками, нередко полное их исчезновение (Страхов, 1963). В связи с этим логично предположить, что наиболее благоприятные условия для высокого накопления сероводорода имеются в пластовых водах, генетически связанных с рассолами известняково-доломитового этапа осадконакопления. Наличие в разрезе осадков эвапоритовых формаций, распространение которых совпадает с зоной развития известняково-доломитовых пород, приводит к накоплению в последних рассолов, отжимающихся в процессе литогенеза осадков из галогенных образований. Эти более высококонцентрированные рассолы, смешиваясь в карбонатных коллекторах с пластовыми водами, обогащенными кислыми газами, при соответствующих условиях способствуют высаливанию газов из раствора и формированию скоплений газов, обогащенных сероводородом. Последнее может привести к обогащению сероводородом газовых залежей, формирующихся в подсолевых отложениях (прежде всего в области пониженных давлений и температур).

В подсольевых отложениях на контакте карбонатных и сульфатно-соленосных пород сосредоточены многочисленные скопления высококонцентрированных сероводородсодержащих газов на юго-востоке Волго-Уральской области, в Восточной Туркмении и Западном Узбекистане, причем в значительной мере их распространение контролируется соленосной толщей (фиг. 3). Однако очень высокое накопление сероводорода наблюдается и в залежах, где отсутствует сульфатно-соленосная покрывка (месторождение Лак), либо последняя не контактирует непосредственно с карбонатными образованиями (месторождения Саратовское, Исимовское в Предуральском прогибе). С другой стороны, в зоне распространения мощных галогенных осадков, нередко газы, сосредоточенные в этих и подстилающих отложениях, лишены сероводорода (месторождения Шебелинское, Кегичевское, Спиваковское и другие в Восточно-Украинском бассейне). Очевидно, сульфатно-соленосная толща, играющая важную роль в формировании и сохранении сероводородсодержащих газовых залежей, не имеет решающего значения для образования кислых газов, генетически связанных, по-видимому, с карбонатными осадками.

Проведенный анализ показал, что размещение сероводородсодержащих газовых залежей в карбонатных коллекторах зависит от особенностей тектонического строения нефтегазоносного бассейна, контролирующего зональность распределения залежей нефти и газа. Основные запасы концентрированных и высококонцентрированных сероводородсодержащих газов (III-V класс), выявлены в зонах преимущественного газоаккумуляции, тяготеющих к погруженным частям депрессий (см. фиг. 3). Наиболее крупные скопления этих газов связаны с газовыми и газоконденсатными месторождениями, распространенными в глубоких частях депрессий (месторождения в Предуральском прогибе), на погружающихся валлообразных поднятиях, распространенных на склонах депрессий (Кульбешкакская, Кандымская, Денгизкульская зоны поднятий; см. фиг. 3) и на приподнятых сводах, непосредственно примыкающих к депрессиям (Оренбургский свод, Гугуртлинское, Учкырское поднятия и др.). В тех случаях, когда газовая залежь подстилается мощным скоплением нефти, нередко сероводород отсутствует в составе свободных газов. Наглядным примером является месторождение Совхозное (Предуральский прогиб). Здесь окисленная нефть (этаж нефтеносности 80-390 м), оттесненная газом книзу, непосредственно контактирует с пластовыми водами и, по-видимому, препятствует накоплению сероводорода в газовой залежи.

На приподнятых бортовых уступах и в краевых частях бассейнов, где распространены нефтяные и газовые залежи, суммарные запасы сероводородсодержащих газов сравнительно невелики. Здесь сосредоточены залежи преимущественно II и I классов (месторождения Бухарской ступени, Южно-Куйбышевского района, Нижнего Поволжья). Более концентрированные сероводородсодержащие газы (II-III класс) связаны прежде всего с газовыми скоплениями, образующимися при выделении газов из нефтей в процессе восходящей миграции флюидов (юго-западные отроги Гиссарского хребта; газовые шапки нефтяных месторождений Волго-Уральской области, Нижнего Поволжья). Сравнительно низкие запасы сероводородсодержащих газов обусловлены как низкими содержаниями серово-



Фиг. 3. Схема размещения месторождений сероводородсодержащих газов на территории Амударьинской впадины

1-4 - месторождения сероводородсодержащих газов: 1 - I класса, 2 - II класса, 3 - III класса, 4 - IV класса; 5 - выявленные структуры; 6 - выступы фундамента: I - Янгизганский, II - Газлинский, III - Гугуртлинский, IV - Чарджоуский, V - Каганский, VI - Мубарекский, VII - Денгизкульский, VIII - Сундуклинский, IX - Бабаджанский, X - Учаджинский; 7 - глубинные разломы; 8 - граница распространения соленосной толщи.

Месторождения и локальные структуры (цифры на схеме): 1 - Янгиказган, 2 - Гугуртли, 3 - Даяхатын, 4 - Кульбешкак, 5 - Кабаклы, 6 - Учкыр, 7 - Газли, 8 - Ташкудук, 9 - Аккум, 10 - Кандым, 11 - Фараб, 12 - Самантепе, 13 - Хаузак, 14 - Денгизкуль, 15 - Уртабулак, 16 - Зеварды, 17 - Памук, 18 - Култак, 19 - Кемачи, 20 - Зекры, 21 - Испанлы, 22 - Дарбаза, 23 - Карим, 24 - Сарыташ, 25 - Караулбаза, 26 - Джаркак, 27 - Сеталантье, 28 - Юлдузкак, 29 - Шуртепе, 30 - Северный Мубар, 31 - Южный Мубарек, 32 - Кассан, 33 - Ходжи-Хайрам, 34 - Кызылрабат, 35 - Майдаджой, 36 - Карабаир, 37 - Байбурак, 38 - Карактай, 39 - Кунгуртау, 40 - Ташлы, 41 - Карайль, 42 - Гумбулак, 43 - Адамташ, 44 - Гирсан, 45 - Сундукли, 46 - Нишан, 47 - Камашы, 48 - Айзават, 49 - Северный Камашы, 50 - Аляудинская группа структур, 51 - Багаджа, 52 - Джилликум, 53 - Еланы, 54 - Верхнее Еланы, 55 - Кели, 56 - Шарали, 57 - Северный Байрам-Али, 58 - Байрам-Али, 59 - Тарханы, 60 - Учаджи, 61 - Верхнее Учаджи, 62 - Северный Репетек, 63 - Майская, 64 - Гагаринская, 65 - Южный Унгуз, 66 - Северный Чешме, 67 - Чешме, 68 - Сакар, 69 - Алат, 70 - Шурчи, 71 - Акджар

дорода, так и относительно небольшими суммарными запасами газов в этих месторождениях.

В зонах распространения многопластовых месторождений запасы сероводородсодержащих газов также невелики, что объясняется прежде всего низкими суммарными запасами газов. Это наглядно видно на примере месторождений Ферганской впадины и Таджикской депрессии, где распространены месторождения с концентрированными сероводородсодержащими газами (см. фиг. 2, В). По-видимому, дизъюнктивные нарушения, явившиеся путями вертикального перетока газов, способствовали формированию залежей на различных гипсометрических уровнях и одновременно способствовали утечке газов из месторождений. В тех случаях, когда многопластовые месторождения корнями связаны с карбонатными образованиями, то залежи, как в карбонатных, так и в перекрывающих их образованиях существенно обеднены сероводородом. Нарушение покрывки над карбонатными породами, благоприятствовавшее формированию залежей в выше лежащих отложениях, способствовало одновременно рассеиванию сероводорода. Подобные явления характерны для месторождений Каганско-Мубарекского выступа, где в карбонатных отложениях юры распространены сероводородсодержащие газовые залежи преимущественно I, реже II класса (см. фиг. 3), а в газовых залежах, сосредоточенных в отложениях мела, сероводород содержится в очень незначительных количествах.

Следовательно, при прочих равных условиях наиболее вероятно обнаружение крупных запасов высококонцентрированных сероводородсодержащих газов в погруженных зонах депрессий (внутриплатформенные впадины, предгорные и краевые прогибы) и на приподнятых погребенных сводах, непосредственно примыкающих к депрессиям. При этом крупные скопления этих газов связаны прежде всего с газовыми и газоконденсатными месторождениями и месторождениями с небольшими нефтяными оторочками. Размещение залежей в этих зонах контролируется распространением известняково-доломитовых пород-коллекторов и перекрывающих их пород-покрывок. На приподнятых бортовых уступах и в краевых частях бассейнов в зонах нефтегазоаккумуляции наиболее концентрированные сероводородсодержащие газы могут быть связаны главным образом с газовыми шапками нефтяных месторождений. Принимая во внимание, что в этих зонах залежи газов локализируются в пределах определенных районов и, учитывая необходимость очистки газов от серосодержащих соединений, при значительных суммарных запасах газов экономически целесообразно их использование для получения серы.

Сероводородсодержащие газовые залежи формируются в морских аридных формациях, выполняющих нефтегазоносные бассейны. С этих позиций наибольшие запасы сероводородсодержащих газов могут быть выявлены в бассейнах древних платформ (Русская, Восточно-Сибирская). Причем, так как на древних платформах размещение газовых месторождений в нефтегазоносных бассейнах контролируется прежде всего распространением сульфатно-соленосной покрывки, под которой сосредоточены основные скопления газов, то, по-видимому, запасы сероводородсодержащих газов составят значительную долю от всех суммарных запасов газов.

Нефтегазоносные бассейны молодых платформ также весьма перспективны для поисков залежей сероводородсодержащих газов, наибольшие запасы которых могут быть выявлены в карбонатных породах мезозоя. Однако от суммы всех запасов газов на долю сероводородсодержащих газов приходится, по-видимому, меньшее количество.

Изложенными выше положениями можно руководствоваться при поисках месторождений концентрированных сероводородсодержащих газов. Авторы, не претендуя на окончательное решение проблемы прогнозирования месторождений сероводородсодержащих газов, считают необходимым проведение дальнейших систематических и углубленных исследований в этом направлении.

#### Литература

- Валяшко М.Г., Власов Н.К. О путях формирования хлор-кальциевых растворов. - *Геохимия*, 1965, № 1.
- Жеребцова И.К., Волкова Н.К. Экспериментальное изучение поведения микроэлементов в процессе естественного солнечного испарения Черного моря и рапы Сасык-Сивашского озера. - *Геохимия*, 1966, № 7.
- Иванов М.В. Роль микробиологических процессов в генезисе месторождений самородной серы. М., "Наука", 1964.
- Ильина Е.Н., Клямер С.Д. Извлечение сероводорода и углекислоты из природного газа и производство элементарной серы. М., изд. ВНИИЭГАЗпром, 1969.
- Карпов А.К., Симоненко В.Ф. Методика изучения природных газов на содержание сероводорода. - *Газовая промышленность*, 1960, № 6.
- Козлов А.Л. Формирование и размещение нефтяных и газовых залежей. М.-Л., Гостогтехиздат, 1959.
- Лондон Э.Е., Мехтиева В.Л. Некоторые результаты получения микрофлоры подземных вод Шебелинского газового месторождения и сопредельных площадей. - *Труды ВНИИГАЗа*, вып. 15(23), 1962.
- Лондон Э.Е. Степень насыщения пластовых вод сульфатами как поисковый признак при оценке перспектив нефтегазоносности. - *Геол. нефти и газа*, 1964, № 11.
- Лондон Э.Е. Поисковое значение органических показателей пластовых вод и условия применимости их в различных типах геохимических обстановок современного залегания скоплений нефти и газа. - В кн.: *Органическое вещество подземных вод и его значение для нефтяной геологии*. Изд. Всес. науч.-исслед. ин-та организации, управл. и экономика нефтегаз. пром. (ВНИИОЭНГ). М., 1967.
- Лондон Э.Е. Гидрогеологические показатели нефтегазоносности и условия их применения для решения поисковых задач. - В кн.: *Гидрогеологические критерии оценки перспектив нефтегазоносности Русской платформы*. Минск, "Наука и техника", 1970.
- Радченко О.А. Геохимические закономерности размещения нефтегазоносных областей мира. М., "Недра", 1965.
- Савченко В.П. Методы направленных газовых месторождений - *Труды ВНИИГАЗа*, вып. 42(50), 1968.
- Страхов Н.М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М., Гостеолтехиздат, 1963.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОВОЙ СЕРЫ В СССР

До последнего времени сероводородсодержащие газовые месторождения специально не изучались. Это объясняется тем, что подобные месторождения были открыты лишь в 60-х годах, а также тем, что среди геологов, занимающихся поисками газовых месторождений, все еще бытует мнение, что сероводород в газах является только вредной примесью, делающей невозможной нормальную разработку газовых месторождений. Но сероводород уже стал крупным источником получения серы, и не учитывать или пренебрегать им теперь невозможно. Однако до тех пор, пока у нас не будут построены газоперерабатывающие заводы и не будет налажено производство газовой серы, сероводород будет рассматриваться геологами-газовиками как вредная примесь и при поисках новых месторождений выявление залежей сероводородсодержащих газов будет по-прежнему нежелательным.

В действительности сероводородсодержащие газовые месторождения являются особо ценными, так как содержат сразу два полезных ископаемых, добыча которых может производиться совместно, со взаимной окупаемостью. Так, например, во Франции открытие газового месторождения Лак, содержащего до 15% сероводорода, позволило стране полностью отказаться от импорта серы, стоимость которой на международном рынке достигает 60 долл. за 1 т. В США добывается более 1,5 млн. т серы из горючих газов в год, в Канаде — более 3,5 млн. т в год. Производство такой серы налаживается в ФРГ в связи с открытием сероводородсодержащих газовых месторождений Баренбург, Дюст, Букхорст.

В нашей стране производство серы из горючих газов не налажено, а два газоперерабатывающих завода находятся в стадии строительства. Сырьевой базой для одного из них будет Оренбургское месторождение, для другого месторождения Средней Азии — Западного Узбекистана и Восточной Туркмении. Запасы газовой серы у нас весьма значительны. По предварительным оценкам, запасы сероводородсодержащих газов в Средней Азии превышают 2 трлн.м<sup>3</sup>. Необходимо учитывать, что затраты на строительство завода по производству серы из газов окупятся практически в первые два года после начала производства. Кроме того, получаемая сера не требует дополнительной очистки. Таким образом, проблема получения серы из газов — проблема государственная.

Уже сейчас имеются данные, на основании которых можно выделить районы, перспективные для поисков и открытия крупных сероводородсодержащих газовых месторождений. В Средней Азии такими районами являются территория Бешкентского прогиба, Мургабская впадина, а также наиболее глубокие части Амударьинской впадины и прежде всего — подсолевые карбонатные отложения этих территорий. Вероятно, выявленные ловушки в подсолевых отложениях будут заполнены газом, содержащим сероводород в значительных концентрациях. Однако разведка подсолевых отложений в перспективных районах ведется крайне недоста-

точно. Это объясняется, с одной стороны, значительной глубиной залегания этих отложений, а с другой стороны, — нежеланием вести поиски заведомо сероводородсодержащих газовых месторождений. Очевидно, с вводом Мубарекского газоперерабатывающего завода и получением серы это положение изменится.

Иногда высказывают сомнение, не вытеснит ли производство серы из газов добычу серы самородной? По-видимому, получение серы из газов необходимо рассматривать как дополнение к нашей горнорудной серной промышленности.

Хотелось бы высказать несогласие с предложением Л.А. Анисимова о способах добычи газов, содержащих сероводород, без строительства сероочистительных заводов. По его мнению, следует перепускать газы с сероводородом из карбонатных коллекторов в терригенные. В последних благодаря присутствию рассеянных форм закисного и окисного железа сероводород будет связываться и газы будут очищаться. Затем уже бессернистый газ можно добывать обычным способом. Однако задача заключается в том, чтобы добывать эти полезные ископаемые совместно.

Предложение Л.А. Анисимова принесет весьма сомнительные выгоды, так как повлечет за собой потери серы и неизбежные дополнительные потери газа, которые сейчас трудно подсчитать. Мы считаем, что правильное решение проблемы заключается в планомерном освоении сероводородсодержащих газовых месторождений и в совместной добыче газа и серы.

В заключение еще раз отметим, что сероводородсодержащие газовые месторождения являются месторождениями также и серы.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие. . . . .	3
Зверев А.С. Основные направления геологоразведочных работ на серу. . .	4
Соколов А.С. Геолого-генетические проблемы серы. . .	10
<u>Уклонский А.С.</u> , Троицкий В.И., Гаврилюк М.Г. К генезису самородной серы. . .	31
Лазарев И.С. Условия формирования залежей метасоматических серных руд. . .	43
Отрешко А.И., Степаненко О.Т. Методы и результаты прогноза перспектив сероносности европейской части СССР. . .	46
Саксеев Г.Т., Суль М.Ф. Генезис месторождений серы Предкарпатского бассейна и направление поисково-разведочных работ. . .	59
Горбачев М.Г. Геологические особенности, генезис, методика поисков месторождений и перспективы Среднеазиатской сероносной провинции. . .	65
Суюнов Н.Т., Мирзаханов М.К., Парникель Е.С., Казаков В.Ф. Перспективы расширения сырьевой базы серной промышленности Туркменской ССР. . .	76
Лазарев И.С., Худайкулиев Х., Кутузов А.П., Хришанович С.Л. Геология и генезис Гаурдакского месторождения серы и перспективы сероносности Гаурдак-Кугитангского района. . .	86
Макушин А.А. Генетические типы проявлений самородной серы в Башкирском Приуралье. . .	94
Рякин Б.С. Особенности геологического строения Подгорненского месторождения самородной серы. . .	99
Вдовиченко Г.М., Лазарев И.С., Сребродольский Б.И. Геолого-минералогическая характеристика и генезис зоны окисления на Гаурдакском месторождении серы. . .	106
Озябкин В.Н. Вторичные изменения карбонатных и сульфатных пород сероносных горизонтов подземными водами. . .	120
Знаменский В.С. Осадочные породы в четвертичных вулканах Курильских островов (в связи с проблемой генезиса вулканогенной самородной серы). . .	123
Поляков Г.П., Яроцкий Г.П., Дмитриев В.Д., Муравьев В.В. Структурные условия локализации вулканогенных залежей серы по геолого-геофизическим и геоморфологическим данным. . .	132
Валеев Р.Н., Шайхутдинова Ф.Г. Тектонические критерии прогноза и поисков месторождений самородной серы платформенных областей. . .	139
Вдовиченко Г.М., Поляков Г.П. Физико-химические аспекты методов поисков месторождений самородной серы. . .	144
Блюменцев А.М., Вельдер А.Б., Онисько М.К., Фельдман И.И. Методы радиоактивного каротажа для изучения серных руд карбонатного типа. . . .	153

Белобродский Ю.Л., Степанов В.И., Полкунов В.Ф. Особенности методики геолого-гидрогеологических исследований месторождений серы для разработки подземной выплавкой и обоснование плотности сети скважин. . .	159
Головин Е.А., Иванов Д.Н. Некоторые общие вопросы изучения генезиса месторождений самородной серы. . .	169
Анисимов Л.А. Вопросы генезиса сероводорода в залежах высокосернистых газов. . .	173
Лондон Э.Е., Кузнецов В.Г., Бухвалов А.С. Перспективы поисков месторождений сероводородсодержащих газов. . .	176
Кузнецов В.Г. Перспективы производства газовой серы в СССР. . .	193

Основные направления геологоразведочных работ на серу. Зверев А.С. - Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Отмечается необходимость расширения сырьевой базы серной промышленности. Дается оценка проведенных геологоразведочных и научно-исследовательских работ на самородную серу. Намечены основные пути повышения эффективности геологоразведочных работ на самородную серу.

УДК 553. 661. 042. 06:622. 014. 3

Геолого-генетические проблемы серы. Соколов А.С. - Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Дана оценка состояния мировой сырьевой базы серы, выделены сероносные провинции, приведена систематизация сероносных площадей. Подробно описаны некоторые бассейны, районы и месторождения. Рассмотрена генетическая классификация и промышленные типы месторождений самородной серы, особое внимание уделено закономерностям их строения и размещения. Описаны некоторые закономерности миграции и накопление серы в общем цикле геологических процессов. Указано на необходимость увеличения сырьевой базы самородной серы, для решения чего необходимы расширение арсенала поисковых критериев, разработка и применение новых методов поисков серы, прежде всего геофизических и геохимических. Перспективным является вовлечение в эксплуатацию сероводородсодержащих газовых месторождений. Илл. 1. Библ. 28 назв.

УДК 553. 661. 06:552. 12:553. 22

К генезису самородной серы. Уклонский А.С., Троицкий В.И., Гаврилюк М.Г. - Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Дано развитие теории парагенезиса серы и углеводородов, подчеркнута особая роль сероводорода в образовании самородной серы. Литологическими исследованиями верхнеюрских карбонатно-сульфатных формаций на газонефтяных месторождениях Средней Азии доказано, что широко развитые эпигенетические процессы ведут к метасоматическому образованию ангидритов по известнякам с возникновением смешанных карбонатно-сульфатных пород. Отрицается возможность метасоматического образования серы по гипсу, основным фактором серообразования признается окисление сероводорода нефтяных вод в зоне их разгрузки. Илл. 2. Библ. 9 назв.

УДК 553. 661. 06:553. 22:552. 12

Условия формирования залежей метасоматических серных руд. Лазарев И.С. - Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Рассмотрены основные условия формирования метасоматических серных руд. Выявлено влияние литологических особенностей продуктивной толщи на качество серных руд, установлена роль проницаемости и водонасыщенности сульфатных пород в формировании серообразующих растворов в зоне затрудненного водообмена. Рассмотрена миграция растворов при неотектонических подвижках. Установлены стадии минерализации парагенезиса серы и возможность значительных накоплений метасоматического кальцита без серы. Указывается возможность захоронения сероносных структур под неоген-четвертичными отложениями, как это имеет место на Донгуэсырте и Шальгеричбабе.

УДК 553. 661. 06. 042 (47)

Методы и результаты прогноза перспектив сероносности европейской части СССР. Отрешко А.И., Степаненко О.Т. – Сб. Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Показано широкое распространение сульфатно-карбонатных комплексов в различных стратиграфических горизонтах. Отмечается решающая роль структурных факторов в преобразовании сульфатных и сульфидных минералов в самородную серу, которая встречается в различных тектонических структурах. Подчеркивается значение молодого альпийского орогенеза для процесса серообразования. Рассматриваются гидрохимические условия образования серных залежей, связь с нефтяными месторождениями и роль углеводородов и сероводорода этих месторождений в формировании залежей самородной серы. На основании составленных карт – литолого-фациальной, тектонической, гидрохимической и карты закарстованности – дается прогнозная оценка ряда сероносных районов и выделяются площади для крупномасштабного прогноза и поисков. Библ. 13 назв.

УДК 553. 661. 06 (477. 83):550. 8

Генезис месторождений серы Предкарпатского бассейна и направление поисково-разведочных работ. Саксеев Г.Т., Суль М.Ф. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Показано наличие в Предкарпатье в составе тирасской свиты двух типов известняков – седиментационных ратынского горизонта и метасоматических сероносных известняков, образовавшихся за счет гипс-ангидритов днестровского горизонта. Приведен широкий комплекс доказательств метасоматической природы образования вторичных известняков: текстурно-структурная унаследованность известняков от гипс-ангидритов, различие в изотопном составе углерода седиментационных и метасоматических известняков и сходство его с углеродом газовых месторождений. Отмечается вероятность увеличения температуры в зоне редукции гипсов, что открывает возможность нового способа поисков серы методом термометрии. Сформулированы основные закономерности образования и размещения серы и дан ряд рекомендаций для поисков новых месторождений. Илл. 1.

Геологические особенности, генезис, методика поисков месторождений и перспективы Среднеазиатской сероносной провинции. Горбачев М.Г. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Дан анализ основных сероконтролирующих факторов, в процессе его выявлена ведущая роль дизъюнктивной тектоники и неотектоники, геоморфологии, а также эффективной пористости, сорбционных свойств серо-вмещающих пород и их способности растворяться хлоридно-натриевыми водами или сернокислыми растворами, идущими во фронте серообразования. Проведено комплексное газо-гидрогеохимическое опробование среднеазиатских месторождений серы и сопоставление результатов. Выявлена закономерность минералогического строения серных месторождений и последовательность образования парагенных минералов из однофазных серообразующих растворов. Разработан новый взгляд на генезис месторождений серы в связи с глубинным сероводородом, дана генетическая их классификация.

Рекомендуются пути усовершенствования методики прогноза и поисков серы в связи с применением дешифрирования аэрофотоснимков, комплексных геофизических и биогеохимических методов. Табл. 2. Библ. 3 назв.

Перспективы расширения сырьевой базы серной промышленности Туркменской ССР. Суюнов Н.Т., Мирзаханов М.К., Парникель Е.С., Казаков В.Ф. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Выделены три литолого-стратиграфических комплекса – верхнеюрский, нижнепалеогеновый и неогеновый, – к которым приурочены месторождения и проявления серы Туркмении. Охарактеризованы перспективы трех основных сероносных бассейнов – Центрально-Туркменского, Восточно-Туркменского и Западно-Туркменского. В качестве источника расширения ресурсов серы рассматриваются месторождения сероводородсодержащих газов в Приамударьинской, Заунгузской и некоторых других сероносных областях. Рекомендованы работы по геолого-экономической оценке мелких и средних месторождений серы и площадей, перспективных на сероводородсодержащие газы. Илл. 1. Библ. 10 назв.

Геология и генезис Гаурдакского месторождения серы и перспективы сероносности Гаурдак-Кугитангского района. Лазарев И.С., Худайкулиев Х., Кутузов А.П., Хрищанович С.Л. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Дана краткая характеристика особенностей геологического строения Гаурдак-Кугитангского района, подчеркнута приуроченность осернения к продуктивной гипс-ангидритовой толще гаурдакской свиты в зонах тектонических нарушений. Выделены две стадии формирования структуры месторождения и два генетических типа серных руд – метасоматический

и гидрогенный. Показаны основные условия формирования месторождения – дислоцированность гипс-ангидритовой толщи и денудации присводовых частей поднятия с приоткрытием зон дробления. Отмечена роль углеводородов в серообразовании. Рассмотрены некоторые черты механизма образования метасоматических руд. Выделены и обоснованы перспективные участки для поисков новых серных залежей в Гаурдак-Кугитангском районе. Илл. 2. Библ. 20 назв.

УДК 553. 661. 06 (470. 52)

Генетические типы проявлений самородной серы в Башкирском Приуралье. Макушин А.А. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Установлено, что большинство находок серы тяготеет к улутелякской свите карбонатно-сульфатных отложений основания кунгурского яруса, концентрирующихся на конседиментационных поднятиях окраины Русской платформы в зоне сочленения с Предуральским краевым прогибом. По палеоусловиям образования эти накопления классифицированы как сингенетичные. Предполагается возможность выявления эпигенетических скоплений самородной серы, а также высказывается вероятность выявления участков, где эпигенетические процессы сероотложения будут наложены на седиментационные серные руды. Илл. 1.

УДК 553. 661. 06 (574. 13)

Особенности геологического строения Подгорненского месторождения самородной серы. Рякин Б.С. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Приводятся данные о Подгорненском месторождении, выявленном в 1970–1971 гг. в Актюбинском Приуралье. Особенности строения Подгорненской антиклинали явились благоприятными для образования серного месторождения. К ним относятся нефтегазоносность структуры, отсутствие каменной соли кунгура над сводом, наличие над сульфатными породами кунгура мульды, заполненной мезозойскими породами, наличие разрывных нарушений. Рассматриваются особенности локализации серного оруденения по отношению к элементам тектонической структуры. Илл. 3. Библ. 7 назв.

УДК 553. 661. 068. 41 (575. 4)

Геолого-минералогическая характеристика и генезис зоны окисления на Гаурдакском месторождении серы. Вдовиченко Г.М., Лазарев И.С., Сребродольский Б.И. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Дана минерало-геохимическая характеристика зоны окисления различных горизонтов месторождения, выявлены ее литологические и геолого-структурные особенности. Большое внимание уделено "шляпе" сернокислотного выветривания, генезис которой рассмотрен с позиций условий формирования серных залежей месторождения. Подробно рассмотрены минеральные новообразования и геохимические особенности, которые могут играть роль прямого поискового признака на месторождениях серы. Табл. 3. Илл. 2. Библ. 12 назв.

УДК 553. 661. 06 (575. 4)

Вторичные изменения карбонатных и сульфатных пород сероносных горизонтов подземными водами. Озябкин В.Н. – Сб.: Генезис месторождений серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Излагаются полученные с применением специальной методики коэффициенты насыщенности подземных вод Гаурдакского серного месторождения сульфатами, карбонатами кальция и магния. Показано, что современные воды месторождения могут участвовать только в двух эпигенетических процессах – растворении кальцита и его замещении гипсом. Табл. 1. Библ. 3 назв.

УДК 553. 661. 06 (571. 6):552. 14

Осадочные породы в четвертичных вулканах Курильских островов (в связи с проблемой генезиса вулканогенной самородной серы). Знаменский В.С. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

В среднеплейстоценовых отложениях вулканических хребтов Курильских островов фиксируются пакки субгоризонтально залегающих переслаивающихся осадочных и вулканогенных пород значительной мощности и площади, названные автором кальдерными отложениями. С этими породами связаны залежи самородной серы. В осадочных породах отмечаются три генерации серы, основная из которых отложена субсинхронно с накоплением толщи кальдерных отложений. Рассмотрены литологические особенности сероносных осадков, позволяющие констатировать преимущественное водно-осадочное происхождение осадочных пород кальдерных отложений. Выводу о субсинхронном накоплении серы не противоречит наличие прослоев замещенных серой и опалом эффузивных пород в сероносной толще, так как осернение лав и туфов происходит на поверхности, после чего они перекрываются сероносными осадками. Илл. 5. Библ. 5 назв.

УДК 553. 661. 06:552. 12

Структурные условия локализации вулканогенных залежей серы по геолого-геофизическим и геоморфологическим данным. Поляков Г.П., Яроцкий Г.П., Дмитриев В.Д., Муравьев В.В. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

На примере Малетойваямского месторождения установлены основные факторы локализации оруденения. Главная роль в рудоконцентрации принадлежит положительным структурам на участках неотектонических депрессий и литологической неоднородности пород. Илл. 2. Библ. 2 назв.

УДК 553. 661. 043:551. 24:[550. 8:528. 94]

Тектонические критерии прогноза и поисков месторождений самородной серы платформенных областей. Валеев Р.Н., Шайхутдинова Ф.Г. – Сб.: Генезис месторождений серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Анализ размещения сероносных бассейнов Русской платформы свидетельствует о тесной связи их размещения с крупнейшими рифтовыми структурами фундамента – авлакогенами. Методом картирования геоморфологических линейных зон установлена резко повышенная плотность тектонической трещиноватости в критической приразломной зоне до 1,5–2,5 км/км<sup>2</sup> против 0,4–0,5 км/км<sup>2</sup> в тыловых участках блоков.

Карты равных плотностей тектонической трещиноватости подтверждают связь месторождений с максимумами плотности и позволяют выделять узкие дифференцированные участки, высокоперспективные на поиски самородной серы. Илл. 2. Библ. 10 назв.

УДК 553. 661:550. 83/84

Физико–химические аспекты методов поисков месторождения самородной серы. Вдовиченко Г.М., Поляков Г.П. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Указано на необходимость разработки геохимических методов поисков серы и на их применение в комплексе с геофизическими методами при поисках месторождений самородной серы. Описан принцип потенциометрического метода измерения окислительно–восстановительного потенциала (ОВП) и рН в грунтах и подземных водах в естественных условиях залегания. Приведены примеры интерпретации результатов измерений на разведанных месторождениях серы, показывающие хорошую сходимость с данными разведки и доказывающие надежность поискового признака по величинам Eh и рН для обнаружения серных залежей. Табл. 1. Илл. 4. Библ. 13 назв.

УДК 553. 661:550. 83

Методы радиоактивного каротажа для изучения серных руд карбонатного типа. Блюменцев А.М., Вельдер А.Б., Онисько М.К., Фельдман И.И. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Рассмотрены возможности применения комплекса методов радиоактивного каротажа (ГТК–П, НК, ГК) для литологического расчленения разреза и выделения серных руд на месторождениях карбонатного типа. Перспективность применения комплекса этих методов доказана исследованиями, проведенными на Гаурдакском месторождении. Приведены предварительные результаты количественного определения содержания серы комплексом методов. Среднеквадратичная ошибка в определении серосодержания в сравнении с данными кернового опробования невелика и составляет  $\pm 4,6$  абс. %. Табл. 2. Илл. 2. Библ. 6 назв.

УДК 553. 661:551. 49:622. 277

Особенности методики геолого–гидрогеологических исследований месторождений серы для разработки подземной выплавкой и обоснование плотности сети скважин. Белобродский Ю.Л., Степанов В.И., Полкунов В.Ф. – Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Особенности исследований при разведке месторождений для подземной выплавки серы заключаются в существенном возрастании объема разведочной информации, что обусловлено введением в состав оценочных показателей дополнительных технологических, горнотехнических, гидрогеологических, водно- и теплофизических параметров, а также в усилении роли комплексного геолого-математического анализа данных разведки. Табл. 3. Библ. 8 назв.

УДК 553. 661. 068

Некоторые общие вопросы изучения генезиса месторождений самородной серы. Головин Е.А., Иванов Д.Н. - Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Важнейшие генетические вопросы изучения месторождений, залегающих в осадочных породах - разграничение сингенетических и эпигенетических (наложенных) минеральных образований, в том числе рудных, пути и масштабы миграции, состав и источник минералообразующих растворов для эпигенетических концентраций, - являются общими для геологов-серников и для геологов, изучающих рудные месторождения. Для достоверного решения их предлагается единая методика. Проведение ее даст материал и для решения еще одного важного вопроса - о пространственной и генетической взаимосвязи различных эпигенетических полезных ископаемых, приуроченных к осадочным породам и не имеющим связи с магматизмом (серы, целестина, полиметаллов, флюорита и др.). Библ. 11 назв.

УДК 553. 661:553. 981. 068

Вопросы генезиса сероводорода в залежах высокосернистых газов. Анисимов Л.А. - Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Приводятся доказательства преимущественно катагенного генезиса сероводорода в осадочной толще. Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями разработки залежей сернистых газов, и мероприятия по очистке природных газов от сероводорода.

УДК 553. 661. 042:550. 848:553. 981

Перспективы поисков месторождений сероводородсодержащих газов. Лондон Э.Е., Кузнецов В.Г., Бухвалов А.С. - Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их поисков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Показано, что залежи сероводородсодержащих газов формируются в карбонатных осадках морских аридных формаций и тяготеют пространственно к нефтегазоносным бассейнам. Выявлены общие для всех газов количественные зависимости между концентрациями кислых и углеводородных составляющих, контролирующие закономерности изменения состава сероводородсодержащих газов. Предложен механизм формирования осадочных месторождений сероводородсодержащих газов и разработана промышленная их классификация, определяющая целесообразность использования газов и технологию производства серы. Табл. 3. Илл. 3. Библ. 13 назв.

Перспективы производства газовой серы в СССР. Кузнецов В.Г. —  
Сб.: Генезис месторождений самородной серы и перспективы их по-  
исков. Изд-во "Наука", 1974 г.

Указано на особую ценность такого источника добычи серы, как не-  
давно открытые сероводородсодержащие газовые месторождения, тем  
более ценные, что содержат сразу два полезных ископаемых. Приведены  
примеры производства серы из горючих газов за рубежом. Намечены  
районы, перспективные для поисков и открытия крупных сероводородсодер-  
жащих газовых месторождений в Средней Азии.

#### ГЕНЕЗИС МЕСТОРОЖДЕНИЙ САМОРОДНОЙ СЕРЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПОИСКОВ

Утверждено к печати

Комиссией по осадочным породам при Отделении геологии,  
геофизики и геохимии АН СССР

Редактор Т.В. Колошина

Редактор издательства Р.Л. Мишина

Технический редактор С.М. Бякерова.

Подписано к печати 18/1 1974 г., Т — 02025. Усл.печ.л. 12,75 + вкл. 0,25  
Уч.-изд.л. 14,66. Формат 60x90<sup>1</sup>/16. Бумага офсетная № 1. Тираж 750 экз.  
Тип. зак. 647 Цена 1 р. 47 к.

Книга издана офсетным способом

Издательство "Наука", 103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21  
1-я типография издательства "Наука". 199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

1 р. 47 к.

884