

<https://doi.org/10.3176/oil.1992.3.01>

УДК 553.983.[546.791 : 546.881 : 546.77]

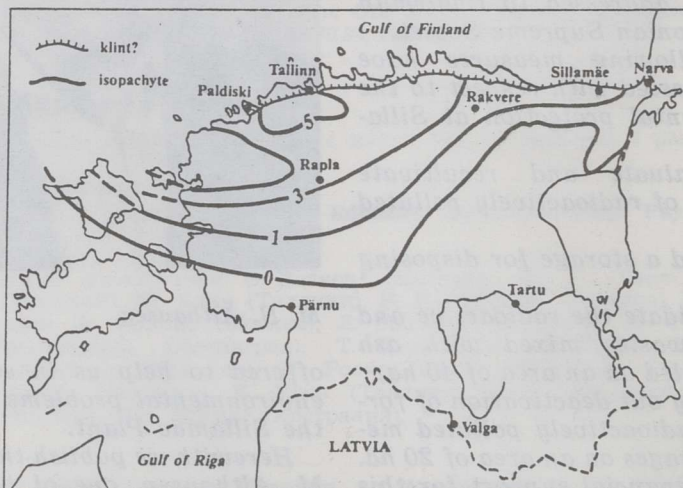
М. Н. АЛЬТГАУЗЕН

МЕТАЛЛОНОСНЫЕ ЧЕРНЫЕ СЛАНЦЫ ВЕНД-НИЖНЕПАЛЕОЗОЙСКОГО ВОЗРАСТА

М. ALTHAUSEN

LOWER PALEOZOIC (RIPHEAN) METALLIFEROUS BLACK SHALES

В публикуемом очерке излагаются результаты изучения металлоносных черных сланцев Прибалтийского бассейна и других месторождений, связанных с верхнепротерозойскими и нижнепалеозойскими черными сланцами (рисунок). Рассматриваются геологические вопросы и практическая значимость черных металлоносных сланцев, затронута проблема охраны окружающей среды.



Интерес к черным сланцам имеет длительную историю.

Еще в начале нынешнего века (1901 г.) появилось сообщение петербургского врача А. В. Пеля, который впервые установил радиоактивность диктионемовых сланцев, залегающих в районе Царского (ныне Красное) села. Вот что писал по этому поводу Д. И. Менделеев: «Силурийская почва... около С.-Петербурга обладает в некоторой степени радиоактивностью, она, по-видимому, влияет на рост многих растений и на состояние здоровья людей»*.

Уже в наше время, перед Второй мировой войной, диктионемовые сланцы Ленинградской области изучали местные ученые Л. М. Курбатов, В. А. Успенский, Б. А. Касаткин, Л. В. Комлев, Н. И. Хитаров. В 40-м г. сравнительно высокие концентрации ванадия были установлены в черных сланцах месторождения Каратау (Казахстан). Из-за войны все эти работы были приостановлены.

* Д. И. Менделеев. «Основы химии» 8-е изд. 1906 г.

Однако именно в те годы обследование черных сланцев началось в США. В результате было выявлено ванадиевое оруденение, которое успешно разрабатывается уже десятки лет. Американцы и не скрывали, что толчком к началу поисковых работ послужила опубликованная в 1941 г. статья советского ученого Соколова «Ванадиевое море Каратау».

Интерес к металлоносности черных сланцев, обусловленный необходимостью создания сырьевой базы для атомной промышленности, значительно возрос в СССР в конце Второй мировой войны. Первоначальное обследование сланцев Эстонии, осуществленное еще до окончания войны, показало, что повышенные концентрации урана наблюдаются по всей полосе их распространения — от мыса Палдиски на западе до Синимяэд у Нарвы на востоке, то есть на протяжении 250 км. Потом выяснилось, что ураноносные диктионемовые сланцы развиты и по всей северной части Ленинградской области до бассейна р. Сясь. Положительные результаты послужили основанием для проведения уже в 1945 г. разведочных и технологических изысканий. Почти одновременно были организованы работы в Ленинградской области, проводившиеся партиями Северной (ныне Нивская) экспедиции, которую в то время возглавлял М. Ф. Пожидаев. Общая протяженность Прибалтийского металлоносного бассейна составила 600 км. В первый же год изучения диктионемовых сланцев выяснилось, что для них характерно повышенное содержание не только урана, но также молибдена и ванадия.

Несколько позднее, в ходе аэрогеофизической съемки, было выявлено большое количество радиометрических аномалий на площадях развития черных сланцев в ряде районов Казахстана, в том числе и в Улутай-Байконурском районе, где потом были установлено Улутайское месторождение контрастных урановых руд, к сожалению, до сих пор не оцененных.

Все это обусловило всестороннее изучение металлоносности черных сланцев в ряде районов, в том числе в Киргизии, где их ураноносность впервые была установлена И. П. Новохатским. Оценку и изучение ураноносности Центрального Тянь-Шаня осуществляла Академия наук Киргизской ССР под руководством М. М. Адышева и К. Е. Калмурзаева, а разведку проводила Каменская экспедиция под руководством Е. Г. Шагарова. К изучению Сарыджазского месторождения был привлечен ВИМС (Н. А. Хрущев, Е. И. Антипычева, Л. В. Воронкевич, И. А. Панов, В. А. Успенский). Аэропартией Краснохолмской экспедиции наличие урана в черных сланцах установлено также в Кызылкумах. К этим сланцам, как выяснилось, приурочены месторождения с урано-ванадиевой минерализацией.

Советские геологи открыли весьма интересные в практическом и научном отношении месторождения в нижнепалеозойской толще Тюрингии (Ранненбургское рудное поле); членом этой рудоносной толщи тоже являются ураноносные черные сланцы. Урановые месторождения в Тюрингии и известной степени были предсказаны ВИМСом еще в 40-х гг. на основании того, что там давно отмечалось повышенное содержание урана в подземных водах в зонах распространения нижнепалеозойских сланцев.

К сказанному следует добавить, что в Северном Казахстане в блоках черных сланцев сосредоточены урановые руды месторождений Восток и Косачиное, а также оруденение северного крыла Балкашского месторождения. На Таймыре известно малоизученное урановое месторождение, тоже приуроченное к черным сланцам; повышенные содержания урана установлены в черных сланцах Украины, Урала, в Западной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Судя по резуль-

татам работ ВостСибНИИ ГТиМС, большой интерес представляет Западно-прибайкальская зона распространения древних ураноносных сланцев, в которых могут быть обнаружены крупные скопления урана и других металлов. Эта зона металлоносных черных сланцев привлекательна не только сама по себе, но и тем, что северная ее часть сочленяется с Байкало-Амурской магистралью, где, как известно, нужны рудные объекты, которые могли бы содействовать экономическому развитию северной части Сибири.

Основные промышленные месторождения урана в черных сланцах сосредоточены в нижнепалеозойских толщах, однако интерес представляют и верхнепротерозойские сланцы с повышенным содержанием углеродистого вещества в Сибири и на Дальнем Востоке. В докембрии в осадочно-метаморфических сланцах внимание привлекают шунгиты и шунгитовые сланцы Заонежья и других районов Карелии. Около 50 лет назад выяснилось, что для шунгитов характерны несколько повышенные содержания не только урана, но и молибдена (до 0,02 %) и других металлов.

На основании обобщения результатов сороколетних исследований ураноносности верхнепротерозойских и нижнепалеозойских черных сланцев, выполненных сотрудниками ВИМСа, ВНИИХТа, ВСЕГЕИ, академий наук Киргизской и Эстонской ССР и производственных организаций, были намечены следующие четыре типа* черных сланцев.

Первый тип — неметаморфизованные горизонтально залегающие сланцы; распределение урана относительно равномерное по всей мощности сланцевого пласта, содержание колеблется в пределах разреза.

Второй тип — метаморфизованные сланцы; распределение урана тоже обычно равномерное, изредка встречаются линзы углеродистого вещества, которое отличается заметно более высоким содержанием урана (например, в Сарыджазском месторождении до 0,12 %).

Третий тип — метаморфизованные сланцы; распределение урана резко неравномерное, он представлен настураном, урановыми чернями и коффинитом. Промышленные урановые руды обнаружены не только в самих черных сланцах, но и в перекрывающих их осадочных толщах и в диабазах.

Четвертый тип — метаморфизованные сланцы; распределение урана тоже неравномерное, но, в отличие от третьего типа, уран в этих рудах представлен урано-ванадатами (карнотит и тюямунит), сосредоточенными в зоне выветривания.

Поскольку достаточно очевидно, что (первичное) накопление урана и других металлов в черных сланцах происходило при осадкообразовании, представляется целесообразным ознакомить читателей с условиями образования месторождений первого типа. Они представлены горизонтально залегающими диктионемовыми сланцами Эстонии и Ленинградской области, а также Швеции, Дании и, вероятно, Польши. Бывшая советская часть этого огромного единого Прибалтийского бассейна, не подвергавшегося складкообразованию, изучена во второй половине 40-х гг. Эстонской экспедицией Сектора № 6.

На основании детальных литологических и минерало-геохимических исследований было выяснено, что содержание урана, молибдена и ванадия (в пересчете на всю мощность сланцевого пласта) в пределах огромной площади бассейна чрезвычайно выдержанное и колебания этих содержаний достигают всего двух-трехкратной величины,

* В данном случае термин 'тип' несколько условен, так как для установления типа требуется большее количество примеров.

причем относительно более высокие содержания отмечены в восточной части Эстонии на площади порядка 500 кв. км. Выяснено также, что в период накопления илов, из которых образовались ураноносные сланцы, эта область была эпиконтинентальным проливнообразным бассейном, соединявшимся как на западе, так и на востоке с открытыми морями, причем более высокие содержания металлов установлены в средней части пролива; они приурочены к определенной фациальной зоне, вытянутой примерно параллельно берегу палеобассейна, в 15—20 км от него; для этой зоны характерно максимальное развитие неслоистых крупнозернистых аргиллитов.

При послыном изучении сланцевого пласта установлено, что в отличие от сравнительно однообразного содержания металлов по всей его мощности в разных типах пород, циклично сменяющих друг друга в разрезе пласта, содержание урана колеблется в широких пределах — от тысячных долей процента до 0,08 %, причем максимальные концентрации урана (а также Мо и V) связаны с неслоистыми крупнозернистыми аргиллитами. Выяснено, что уран примерно в разных количествах распределен между тремя носителями: дисперсным алюмосиликатным веществом, углеродистым веществом и мелкими оолитами фосфата кальция; кроме того, 5—10 % урана (от общего количества) представлено настураном и урановыми чернями, а небольшая часть молибдена — молибденитом катагенного происхождения.

Закономерная зависимость распределения урана, молибдена и ванадия от типов пород не оставляет никаких сомнений в том, что их накопление происходило в стадию осадкообразования и раннего диагенеза, причем их последующее перераспределение было незначительным, хотя оно установлено достаточно достоверно. В имевшем место перераспределении убеждает абсолютный возраст катагенетического настурана, который отличается от возраста осадков на 300—350 млн. лет. О перераспределении небольшой части молибдена свидетельствуют размеры чешуек новообразованного молибденита, в десятки раз превышающие размеры обломочного материала, слагающего сланцы. Наконец, довольно отчетливы следы выноса из сланцев некоторого количества ванадия вместе с продуктами катагенетического разложения органического вещества, представленного линзами ванадийсодержащего асфальтита, который встречается в глауконитовых песчаниках, перекрывающих с размывом пласт диктионемовых сланцев.

Диктионемовые сланцы водонепроницаемы. Однако, как было установлено ВИМСом еще в 40-х гг., после выемки из недр куски сланца в течение 2—3 лет превращаются в рыхлую дресву и из них выщелачивается водой до 60 % урана и около 30—40 % молибдена. Исследованиями ВИМСа впоследствии выяснилось, что в этом процессе решающее значение играет жизнедеятельность тионовых бактерий.

Метаморфизованные черные сланцы, в основном с рассеянным распределением металлов, развиты во многих складчатых областях. Обращает на себя внимание то, что на площадях распространения черных сланцев второго типа встречаются лишь редкие проявления магматической деятельности, представленные единичными дайками диабазов; иногда они совсем отсутствуют; этим они отличаются от ураноносных черных сланцев третьего и четвертого типов. По сути дела сланцы второго типа являются аналогами сланцев первого типа, но подвергшихся региональному метаморфизму начальной (зеленокаменной) стадии. Имеются, правда, и другие отличия от прибалтийских сланцев, а именно, более высокое содержание кремнезема, благодаря чему их часто называют «углеродисто-кремнистыми». Кроме того, в пределах изученных площадей распространения черных слан-

цев второго типа (Каратау, Джеобаглы, Сарыджас) наблюдается несколько меньшее содержание урана и значительные концентрации ванадия (иногда до 1—2 % V_2O_5). Изредка в сланцах второго типа встречаются пластообразные линзы углеподобного органического вещества с повышенным содержанием урана (до 0,6 %). Протяженность таких линз достигает нескольких сотен метров.

Несмотря на значительное уплотнение сланцев второго типа в результате метаморфизма, вызывающего графитизацию углеродистого и перекристаллизацию силикатного вещества, даже в суровых климатических условиях высокогорного Тяньшаньского региона атмосферными осадками уран выщелачивается из них. Этот вывод сделан в ВИМСе на основании рассмотрения обедненных ураном естественных обнажений сланцев, а также повышенного содержания урана в водах ручья, просачивающихся через отвал сланцев.

Рассмотрим подробнее три взаимосвязанные соображения, которые основываются на данных ВИМСа об областях распространения ураноносных сланцев первых двух типов: об источниках урана, о значительных перспективах ураноносных осадочных толщ и о вероятности существования в истории геологического развития Земли эпох относительно более интенсивного накопления урана и сопутствующих ему элементов в морских осадках, в том числе — и в первую очередь — нижнепалеозойского возраста.

Вопрос об источниках урана, участвовавшего в образовании осадочных месторождений различных типов, вызывал и вызывает много споров и, конечно, какое-то время еще будет дискуссионным и потребует немалых усилий для разрешения применительно к каждому конкретному типу месторождения. Но для диктионемовых сланцев он решился сравнительно просто и вот каким образом. Исходя из возможной интенсивности эрозионных процессов на берегах, обрамлявших прибалтийский проливообразный палеобассейн в период накопления илов, из которых образовались диктионемовые сланцы, выяснили, что с суши могло быть принесено менее одной сотой доли того количества урана, которое сконцентрировано в сланцах. Если к этому добавить, что в диктионемовых сланцах не установлено никаких следов эндогенных процессов, то не остается никаких сомнений в том, что источником урана могли быть только морские воды, протекавшие через пролив с запада на восток.*

Анализируя палеогеографическую обстановку, существовавшую в областях распространения черных металлоносных сланцев второго типа в Южном Казахстане и Киргизии, где в смежных районах отмечалась сравнительно интенсивная синхронная вулканическая деятельность, некоторые исследователи (С. Г. Анкинович, Е. А. Анкинович и др.) пришли к предположению о том, что уран поступал в морские воды из глубин земной коры в процессе этих извержений, и затем течения переносили его в смежные более спокойные зоны, где он и накапливался в благоприятной (восстановительной) обстановке. Справедливо или нет такое представление, нам пока неизвестно. Но с учетом даже этих соображений становится очевидным, что непосредственным источником урана в зонах накопления илов, из которых образовались металлоносные сланцы, были морские воды.

Первое обобщение материалов о нижнепалеозойских металлоносных черных сланцах США, Англии, Испании, Норвегии, Дании, Швеции, ГДР, Бессарабии, Эстонии, Тимане, Ленинградской и Каменец-Подольской областей, Урала, Казахстана, Киргизии, Узбекистана, Горной

* Направление течения с запада на восток было установлено литологическими исследованиями — по ориентировке косой слоистости в прослоях алевролитов в начальных слоях циклов осадконакопления.

Шории, Саян, Сибирской платформы, Анабара, Китая, Кореи, осуществленное еще в 50-х гг., свидетельствовало о широком их распространении и довольно большом сходстве специфических геохимических особенностей сланцев из разных регионов. Особенно обращало на себя внимание почти повсеместное повышенное содержание в них как урана, так и молибдена, ванадия и фосфора, а также наличие в ряде районов распространения черных сланцев близких к ним по возрасту фосфоритовых месторождений. Все это привело к выводу о том, что в истории геологического развития Земли имела место планетарная нижнепалеозойская эпоха осадочного накопления перечисленных элементов. В этой связи, естественно, встал вопрос о причинах возникновения металлогенических осадочных эпох. При рассмотрении вероятности примерно одновременного накопления урана, молибдена и ванадия во многих областях северного полушария было отвергнуто бытовавшее в 40-х и 50-х гг. представление о том, что источником урана, накапливающегося в морских осадках, являются разрушающиеся породы ближайшей суши. Было высказано предположение, что источником его (а также некоторых других элементов) могли быть только морские воды, что к тому времени, как указывалось выше, было установлено на примере Прибалтийского района. При этом было высказано предположение о том, что одной из причин возникновения этой эпохи явились благоприятные условия для концентрации редких металлов и фосфора в гидросфере докембрия, обусловленные обилием углекислоты в атмосфере и гидросфере, что определялось малым развитием биологических процессов.

Кроме того, данные К. Брукса свидетельствовали об интенсивной верхнепротерозойской эффузивной деятельности и похолодании в планетарном масштабе, то есть в период, предшествовавший нижнепалеозойской металлогенической эпохе; затем, в связи с потеплением климата, последовало интенсивное развитие процессов выветривания горных пород на суше. Сочетание этих явлений в предпалеозойское время могло привести к дополнительной минерализации гидросферы, что, вероятно, является второй причиной, обусловившей возникновение рассматриваемой эпохи.

Третьей причиной следует считать развитие растительной жизни в верхах докембрия и особенно в нижнепалеозойское время, приведшее к уменьшению концентрации углекислоты в атмосфере и гидросфере, что, в свою очередь, снизило растворимость редких металлов и их осаждение, так как при осадкообразовании именно органическое вещество в большинстве случаев является одним из главных осадителей урана, молибдена и ванадия.

Из многочисленных сводных работ известно, что в нижнем кембрии началась одна из крупнейших трансгрессий, а в ордовике — самая крупная трансгрессия, в период которой, по подсчетам К. Брукса, площадь суши уменьшилась до 15% от общей поверхности Земли.

В результате этих трансгрессий возникли сравнительно неглубокие эпиконтинентальные моря, частично проливообразные. Именно в этих мелководных проливах при наличии пологих заболоченных берегов создавались наиболее благоприятные условия для интенсивного и относительно концентрированного осаждения фосфора, урана, молибдена, ванадия и других металлов; такова четвертая причина возникновения нижнепалеозойской металлогенической эпохи.

Открытие Прибалтийского металлоносного сланцевого бассейна уже в начальный период поисков урановых руд позволило усомниться в справедливости существовавшего в то время скептического отношения сравнительно большого числа геологов к перспективности экзогенных месторождений и, наряду с результатами исследования фер-

ганских месторождений, стало по существу первой предпосылкой для уверенности в том, что осадочные месторождения займут существенное место в общем балансе уранового сырья; сейчас этого уже никто не оспаривает.

Важным обстоятельством явилось и то, что в сланцах Прибалтики были установлены маломощные (1—2 см) прослои с относительно высокими концентрациями урана (0,1 %), а также обнаружены фосфатные оолиты, содержащие более 1 % урана. Все это свидетельствует о том, что в природе протекали такие экзогенные процессы, которые не только приводили к скоплению больших масс урана, но и могли создавать сравнительно высокие его концентрации.

Дополнительной предпосылкой были чисто статистические данные, указывающие, что в осадочных толщах должны существовать еще не выявленные образования с повышенной концентрацией урана: эти предпосылки заключались в следующем. В современной гидросфере содержание урана составляет менее 1 % от того количества, которое некогда было связано с изверженными (ныне разрушенными) породами. Следовательно, в осадочных образованиях должен быть сосредоточен почти весь уран разрушенных пород, а среднее его содержание в осадках должно бы соответствовать среднему содержанию в изверженных породах. Вместе с тем ранее бытовало мнение, что среднее содержание урана в изученной части осадочного чехла в 4 раза ниже, чем в изверженных породах, такие же соотношения считались справедливыми и для фосфора. Эти данные давали основания предполагать, что кларк урана осадочных пород занижен, поскольку еще не были обнаружены осадочные образования с повышенным его содержанием. Можно было предполагать, что, коль скоро эти обогащенные толщи еще не учтены, они встречаются сравнительно редко, и, следовательно, содержание урана в них должно быть достаточно высоким, чтобы компенсировать наметившийся мнимый дефицит. Дефицит по фосфору, видимо, в какой-то степени компенсируется огромным количеством фосфоритовых месторождений, не учтенных при подсчете кларков.

Мы были далеки от мысли, что мнимый дефицит отдельных элементов в осадочных образованиях компенсируется только промышленными их концентрациями, так как таковые, конечно, составляют в общем балансе элементов незначительную часть. Но все же наличие такого дефицита расценивалось в те годы как обоснование для сомнения о вероятности существования осадочных образований с отчетливо повышенными концентрациями урана, что и было доказано последующими геологоразведочными изысканиями.

Таким образом, на основании результатов изучения первых двух типов месторождений был поставлен и, как нам кажется, в известной степени решен ряд вопросов, связанных с седиментационными процессами — с первичным накоплением урана. Однако не эти процессы создают контрастные (и более богатые) урановые руды третьего и четвертого типов месторождений, связанных с толщами черных сланцев. Их образование связано с процессами перераспределения и, возможно, с дополнительным привносом урана из недр.

В месторождениях третьего типа установлено наличие скоплений урана в мелких трещинах. Весьма характерно и локальное «обеление» черных сланцев; причем оруденение развивается как раз вдоль границ «обеленных» и черных сланцев, распространяясь в черные породы на расстояние до 10—15 м от этой границы. Кроме того, настуран в ассоциации с пиритом, марказитом, арсенопиритом, апатитом, кварцем, карбонатами и баритом слагает маломощные прожилки в пределах секущих и послойных зон дробления и рассланцевания, а также цементирует тектонические брекчии. Вокруг каждого скопле-

ния ураносодержащего минерального комплекса, независимо от морфологии его выделения, наблюдается «обеление» черных сланцев на глубину от 3—5 мм до нескольких сантиметров. Для сланцев месторождений третьего типа характерна примерно та же ассоциация элементов, что и для месторождений двух первых типов, то есть повышенные содержания молибдена, ванадия и фосфора. Причем не исключено, что уран находится там не только в виде настурана, урановых черней и коффинита, но и в иной, пока не выясненной форме.

На месторождениях третьего типа установлено, что как сланцы, так и вышележащие толщи подвергались низкотемпературному метаморфизму, проявляющемуся очень неравномерно и зависящему от интенсивности тектонических деформаций. Выяснено также, что в пределах крупных рудных тел встречаются как бедные руды с рассеянным распределением урана, имеющие пластообразную форму, так и более богатые, с настурановой минерализацией, которая иногда контролируется сбросами и сбрососдвигами.

Примерно тридцать лет тому назад этот тип урановых месторождений был отнесен Р. В. Гецевой к осадочно-метаморфическим образованиям. Однако, поскольку оруденение встречается не только в сланцевой толще, но и в других породах, включая и пластообразные залежи диабазов, а также в связи с тем, что, как подчеркивают Б. Л. Рыбалов и В. А. Головин, рудовмещающие породы подвергались изменениям, аналогичным аргиллизацией, наблюдаемой на месторождениях жильного типа, многие считают эти месторождения гидротермальными.

В последнее время внимание уделяется экзогенному перераспределению урана, которое приводит к его выносу из верхних частей месторождений и вторичному накоплению на глубине с образованием обогащенной зоны цементации.

Б. Л. Рыбалов и В. А. Головин отмечают также, что прожилково-вкрапленные руды по минерало-геохимическим и текстурно-структурным особенностям обнаруживают большое сходство с рудами месторождений платформенного чехла, находящихся в непосредственной близости от месторождений, сосредоточенных в черных палеозойских сланцах, и имеют близкий абсолютный возраст оруденения (90—170 млн. лет). На основании этих данных они пришли к выводу о том, что ураноносные растворы имеют смешанное — эндогенно-экзогенное происхождение и образовались в результате поступления снизу газо-теплого потока, который смешивался с пластовыми и трещинно-пластовыми водами складчатого основания и наложенных депрессионных структур. Вместе с тем они отмечают, что нельзя не учитывать тесную пространственную приуроченность рассматриваемых месторождений к отложениям, регионально зараженным ураном, и возможность заимствования его из черных сланцев, хотя, с другой стороны, они считают вероятным поступление урана с гидротермальными растворами из более глубоких частей земной коры — из подстилающих кристаллических пород основания.

Четвертый тип — месторождения с относительно контрастной уранованадатовой минерализацией, тоже сосредоточенные в нижнепалеозойских сланцах, — установлен пока только в Кызылкумской урановой провинции, где открыто несколько таких месторождений (Рудное, Косчека, Джантуар и др.). На более изученном месторождении Рудное оруденение приурочено к сводовой части крупной антиклинали, осложненной рядом складчатых структур второго и более высоких порядков, а так же к пологим разрывным нарушениям. Проявления магматической деятельности в данном случае представлены нижнепалеозойскими межпластовыми силлеобразными залежами, реже штоками и дайками диабазов и габбро-диабазов, превращенных в зеленые альбит-эпидот-амфиболовые сланцы; они участвуют в складчат-

тости нижнепалеозойских толщ. Более молодые (пермские) интрузивные тела, преимущественно гранитоидного состава, широко развитые в Кызылкумской провинции, в районе месторождения отсутствуют.

В результате работы Краснохолмской экспедиции под руководством Н. Н. Муромцева, а также В. Б. Голубева (ВСЕГЕИ), И. А. Недошивина (ВИМС) и других исследователей выяснено, что рудные тела представляют собой пластообразные залежи, почти согласные с напластованием вмещающих пород; пространственно они тяготеют к пологим межпластовым зонам дробления и милонитизации; однако сами разрывные структуры крупных скоплений урана не содержат. Все известные рудные тела приурочены к свите, сложенной переслаиваемыми углеродистыми кварцитами, доломитами, доломитизированными известняками и филлитами. Все известные рудные тела месторождений четвертого типа расположены в коре выветривания на глубинах до 130—150 м. Наиболее богатые руды, как правило, локализованы в местах флексурных изгибов, пологих нарушений или в узлах их сочленений с крутопадающими сбросо-сдвигами. Повышенные содержания урана, ванадия, молибдена, цинка, меди и серебра сосредоточены в породах, отличающихся повышенным содержанием углеродистого вещества. Распределение уран-ванадатовой минерализации, представленной в основном карнотитом и в меньшей степени тюамунитом и отенитом, неравномерно, она выполняет тонкие трещинки, реже представлена вкрапленностью. Настуран и коффинит встречаются редко, в виде мелких скоплений в углеродистых кварцитах. Карнотит и тюамунит представлены порошкообразными налетами и колломорфными скоплениями размером 0,01—0,1 мм, иногда они находятся в сростках с гетитом, галлуазитом, реже баритом*.

Еще за пять лет до открытия месторождения Рудное И. В. Швейц отметил, что среди многочисленных проявлений «коловоротитовой» минерализации, связанной с черными сланцами Кызылкумов, имеются проявления, приуроченные к зонам дробления и повышенной трещиноватости, которые могут представлять собой как зону окисления первично гидротермального оруднения, так и окисленную часть зон цементации таких месторождений.

Хотя с тех пор найдены и изучаются ряд месторождений, среди исследователей пока нет единой точки зрения на генезис уран-ванадатового оруднения.

В. Б. Голубев, считающий, что оруденение связано с процессами выветривания черных сланцев, выделяет следующие стадии формирования оруденения:

первая — сингенетическая;

вторая — некоторое перераспределение урана при контактовом метаморфизме в связи с внедрением преимущественно нижнепалеозойских пластовых интрузий основного состава;

третья (триас-юрская) — перераспределение ванадия при корообразовании в платформенных условиях и скопление его в зоне цементации;

четвертая (альпийская) — протекавшая в условиях постплатформенного орогема.

В. В. Голубев считает, что главная часть криотит-гетит-галлуазитовой минерализации связана с третьей стадией, хотя частично эта минерализация накладывается и на неоген-четвертичную зону приповерхностного окисления.

* В последние годы в глубинных частях этих месторождений отчетливо установлено наличие урановой минерализации, характерной для месторождений третьего типа.

А. И. Недошивин, обращая внимание на развитие уран-ванадатовой минерализации после формирования неоген-четвертичной зоны выветривания и подчеркивая отсутствие структур замещения, пришел к выводу о том, что промышленное оруденение образовалось не в результате окисления первичных руд, а путем непосредственного выпадения урана из растворов и что это были восходящие горячие кислые восстановительные растворы неоген-четвертичного возраста. Четкого ответа на вопрос о происхождении этих растворов, а также о количественном значении сингенетических скоплений урана и ванадия в образовании уран-ванадатовых руд мы пока не имеем. Однако И. А. Недошивин предполагает, что часть элементов могла быть заимствована из нижнепалеозойских урансодержащих сланцев и что в нижнепалеозойских толщах данной провинции могут быть встречены месторождения по крайней мере четырех генетических типов:

- а) сингенетические;
- б) метаморфогенные;
- в) сформировавшиеся на стыке восходящих кислых восстановительных растворов с приповерхностными кислородными водами;
- г) коры выветривания.

Опуская пока вопрос о вероятности выявления в нижнепалеозойских сланцевых толщах Кызылкумской провинции урановых месторождений разных типов, можно с удовлетворением указать на то, что к настоящему времени твердо установлена важная эмпирическая закономерность — приуроченность скоплений урана четвертого типа только к корам выветривания черных сланцев.

Месторождения третьего и четвертого типов изучались в 60-х и 70-х гг., изучаются они и сейчас, и поэтому результаты этих исследований в данном очерке освещены не полностью, поскольку автор ограничил себя изложением в основном результатов исследований, осуществленных ВИМСом в более ранние годы. Отметим только, что в изучении месторождений третьего типа активно участвовали Г. В. Пакульнис и В. А. Петров, а четвертого — И. А. Недошивин и многие другие исследователи. Считаю также необходимым сказать, что в 1963 г. И. В. Швей предсказал вероятность выявления промышленных месторождений в черных сланцах Кызылкумов, что впоследствии вполне подтвердилось*.

Прежде чем завершить очерк, посвященный ураноносным черным сланцам, считаю возможным отметить, что в результате почти полувекового их исследования в известной степени установлены:

- 1) их пространственное и возрастное распространение;
- 2) их минералого-петрографический и химический состав;
- 3) фациальное положение зон повышенной металлоносности;
- 4) закономерности распределения и формы нахождения урана, молибдена и ванадия в различных типах сланцев при первично-осадочном накоплении вещества и при последующем перераспределении в стадии диагенеза, катагенеза и метаморфизма, а также в результате возможного привноса.

Определены тектонические и палеогеографические условия накопления глинистых осадков с повышенными содержаниями органического вещества урана, молибдена, ванадия и других элементов, частично разработаны представления об источниках урана, условиях его переноса и седиментационного накопления и перераспределения при катагенезе, в меньшей степени при метаморфизме и последующих

* Полная характеристика месторождений третьего и четвертого типов и обзор гипотез об их образовании изложены в отдельной работе М. Н. Альтгаузена «Типы скоплений урана в нижнепалеозойских и верхнепротерозойских черных сланцах и гипотезы их образования» (М., 1979 г.).

гипергенных процессах; высказаны соображения о причинах возникновения эпох седиментационного накопления редких металлов в морских осадках; разработаны предпосылки для работы технологов.

Верхнепротерозойские и нижнепалеозойские черные сланцы несут в себе феноменальные запасы урана и других металлов. В пределах бывшего Советского Союза в них сосредоточено не менее 50 млн. тонн урана, а также огромные запасы молибдена, ванадия, редких земель; к ним приурочены (или находятся по соседству) крупные месторождения золота, местами установлены повышенные концентрации серебра, олова. Потенциальные запасы урана в Прибалтийском бассейне составляют порядка 5 млн. тонн, а запасы молибдена в Эстонии и Ленинградской области — около 10 млн. тонн, что соответствует мировым суммарным запасам этого металла.

Напомним, что на международном симпозиуме, посвященном урановым месторождениям, состоявшемся в 1974 г. в Афинах, ведущий специалист США в этой области Р. Д. Найннджер указывал, что в юго-восточной части США в черных сланцах сосредоточено несколько миллионов тонн урана при содержаниях 0,005—0,01 %. Вместе с тем он высказал сомнение в возможности их использования в связи с проблемой защиты окружающей среды и высокой стоимостью продукции (около 100 долл. за фунт U_2O_3). В наших сланцах месторождений первого и второго типов содержание урана в ряде случаев выше, а следовательно, стоимость урана должна, соответственно, быть много ниже даже если не учитывать ценности молибдена и ванадия, которые можно и должно извлекать попутно.

Считаю необходимым отметить, что представленная тогда Р. Д. Найннджером сводная таблица достоверных мировых запасов урана (без СССР, стран Восточной Европы и Китая), которые можно эксплуатировать при стоимости 10—15 долларов за фунт, свидетельствует о том, что самыми крупными запасами урана (38 % от мировых запасов этой категории) располагает Швеция, причем основная их часть сосредоточена в черных сланцах, которые представляют собой аналог диктионемовых сланцев Эстонии и Ленинградской области, первичные осадки которых накапливались в едином нижнеордовикском палеобассейне. Р. Д. Найннджер подчеркивает, что суммарные запасы Швеции (достоверные и прогнозные) составляют 400 тыс. тонн урана. При этом он совершенно не упоминает о том, что черные урансодержащие сланцы представляют собой комплексное сырье, причем, как, например, в Каратау, ведущим элементом в них является ванадий, а в диктионемовых сланцах Прибалтики, кроме урана и ванадия, — еще и молибден.

Помимо безвозвратных потерь металлов и теплотворных свойств диктионемовых сланцев (1000—1200 ккал/кг) в Эстонии существует и вторая проблема. В этом регионе металлоносные сланцы залегают непосредственно над фосфоритами, которые добывают открытым способом. При этом сланцы сбрасываются в отвал, где под воздействием тионовых бактерий происходит их самовозгорание, а атмосферными осадками из них выщелачивается сульфат окиси железа, уран и другие металлы. Содержание урана в водах, просачивающихся через отвалы рудника, местами превышает предельно допустимую санитарную норму. По разным причинам гибнут лесонасаждения; отмечен падеж скота; у школьников двух поселков, расположенных около фосфоритового комбината, установлены заболевания, не характерные для данного региона. Зараженная вода дренируется в артезианские бассейны и Балтийское море.

Когда стало очевидным, что в диктионемовых сланцах Эстонии сосредоточены очень большие запасы урана, к разработке способов

его извлечения были привлечены шесть научно-исследовательских институтов. Наибольшие результаты были получены ВИМСом под руководством его директора И. В. Шманенкова; эти исследования завершились заводскими опытами. (Завод был сильно поврежден в военное время.)

В результате заводских опытов был получен урановый концентрат. Весной 1945 г. в Кремле происходило рассмотрение на высшем уровне мероприятий по созданию сырьевой базы атомной промышленности. На заседании были Берия, Ворошилов, Маленков, Микоян, Завенягин, Антропов, академик П. Л. Капица и С. В. Смирнов, начальник Первого геологического управления С. В. Горюмов, а от ВИМСа Д. И. Щербаков и М. Н. Альтгаузен. Доклад делал И. И. Малышев. Заседание началось в 12 часов ночи и завершилось около 6 часов утра. В конце доклада И. И. Малышев подчеркнул, что богатых гидротермальных руд в стране еще мало, однако очень большие запасы осадочных руд выявлены в Эстонии — это диктионемовые сланцы. Для извлечения из них урана ВИМС разработал технологию, путем заводских опытов проверенную в городе Нарва. Говоря это, И. И. Малышев положил на стол кусок сланца и поставил трехлитровую банку с урановым концентратом.

Это сообщение вызвало у всех большой интерес. Ворошилов подошел к себе банку с концентратом и, взяв в руки кусок сланца, сказал, что в случае нужды будет получать уран для атомной промышленности и из такой глины.

В конце 40-х и в 50-х гг. в ряде институтов разрабатывались технологии извлечения металлов из диктионемовых сланцев, а в Институте химии АН ЭССР они продолжались до 70-х гг. под руководством Р. П. Коха и Э. Я. Маремая.

По прежним работам наиболее интересными оказались три технологии: автоклавная, созданная во ВНИИХТе под руководством академика В. Н. Ласкорина, уже опробованная в ползаводском масштабе, биохимическая ВИМСа, проверка которой в ползаводском масштабе не была завершена, и комплексная гидрометаллургическая АН ЭССР, еще не проверенная в укрупненных опытах; поэтому по ней пока нет технико-экономических расчетов. По первым двум технологиям такие расчеты осуществлены; они показали, что стоимость урана оказывается приемлемой. При этом очевидно, что капитальные затраты на строительство завода по биохимической схеме в несколько раз меньше, чем по другим технологиям.

Вопрос об утилизации металлоносных черных сланцев и охраны природной среды от загрязнения для Эстонии стоит настолько остро, что он был предметом специального выступления президента АН ЭССР К. Ребане на Сессии Верховного Совета СССР. Будем надеяться, что эра недостаточного внимания к проблемам рационального использования недр и охраны природы от загрязнения закончилась и задача комплексной разработки сланцево-фосфоритовых месторождений Эстонии сдвинется с мертвой точки.

В отношении дальнейших многоплановых исследований по проблеме черных сланцев позволю себе высказать уверенность в том, что они не только должны, но и будут развиваться, как того заслуживает огромное значение процесса первично-осадочного накопления вещества, из которого образовались металлоносные сланцы, и многогранность последующих процессов перераспределения металлов в стадию их бытия с образованием больших запасов промышленных руд. Не сомневаюсь, что работы в данной области дадут очень много как для познания сути природных процессов, так и в деле выявления промышленных месторождений урана и других металлов и фосфора, а также для создания новых приемов переработки руд.

M. ALTHAUSEN

LOWER PALEOZOIC (RIPHEAN) METALLIFEROUS BLACK SHALES

Summary

In this report results of the study of metalliferous Upper Proterozoic and Lower Paleozoic black shales from the Baltic basin and other deposits are presented.

Black shales have been long studied. Already at the beginning of our century (1901) the radioactivity of the dictyonema shales deposited near St. Petersburg was established. Before World War II the black shales occurring in the Leningrad Region were studied in more detail. Also, Kazakhstan black shales were found to contain high amounts of vanadium.

The war interrupted these investigations, but at the end of the war the demand for uranium for nuclear power purposes aroused wide interest in prospecting for uranium. Already in 1945, geological research of Estonian dictyonema shales was carried out. It was established that along the northern shore, from Paldiski in the west to Narva in the east, and in the northern part of the Leningrad Region uraniumiferous dictyonema shales are distributed for a distance of 600 km. The dictyonema shales were found to contain increased amounts of molybdenum and vanadium. Later, using aeroradiometric prospecting new uranium deposits were discovered in Kazakhstan and Kirgizia. Also, high amounts of uranium in black shales of the Ukraine, the Urals, West- and East-Siberia and the Far-East have been established. Uranium has been found by Soviet geologists in the Thuringian Region. According to the uranium mineralization type this ore is confined to black shales.

Based on the results of a study of different black shales, they are divided into four types:

- (1) Nonmetamorphosed horizontally lying shales with a uniform distribution of uranium in the bed.
- (2) Metamorphosed shales with a uniform distribution of uranium and having sometimes small lenses of organic matter with a high content of uranium (up to 0.12 %).
- (3) Metamorphosed shales with a nonuniform distribution of uranium where its mineralization is characterized by the presence of pitchblende, uraninite and coffinite.
- (4) Metamorphosed shales with a nonuniform distribution of uranium where its mineralization occurs in association with vanadate (carnotite and tyuyamunite).

Dictyonema shales from Estonia and Leningrad region, as well as shales of Sweden, Denmark and Poland belong to the first type. Uranium and other metals were accumulated in these black shales in the process of sedimentation. It has been established that during formation of uraniumiferous dictyonema shales the Baltic deposit was a basin connected with the sea in the west and east and through which water flew. Dictyonema shales originate from a certain facies zone running parallel to the shore. The uranium contained in black shales is not in the mineral form. It is mainly associated with dispersed alumina-silica and organic matter, as well as phosphates. 5—10 % of uranium is present in the mineral form as uraninite and pitchblende.

Dictyonema shales are watertight. But during 2—3 years after excavation the shale particles turn into a friable mass, of which, 60 % of uranium and 30—40 % of molybdenum will be leached out by water. At the same time, the activity of thio bacteria substantially increases the release of metals from the shales.

Shales from the deposits of the second type (Karatau) are characterized by an increased content of vanadium, reaching 1—2 % of V_2O_5 .

Data about the origin of uranium in different sedimentary deposits is conflicting. As to dictyonema shales, uranium is derived not from the erosion of the Paleozoic basin, but from sea water, flowing through the strait from west to east.

Generalizing the results of investigations of Lower Paleozoic metalliferous black shales of the USA, England, Sweden, Estonia, Kazakhstan, Kirgizia,

China and other countries it can be established that the shales are very widespread and they are very similar in geochemical characteristics, such as increased uranium, molybdenum, vanadium and phosphorus contents, as well as their frequent occurrence together with phosphorites. So, it can be concluded that in the geological history there was a global Lower Paleozoic period of sedimentary metals accumulation suggesting that the following factors influenced the process:

- (1) Abundance of carbon dioxide in the atmosphere and hydrosphere caused the concentration of metals and phosphorus in the Precambrian hydrosphere.
- (2) An active weathering and erosion of rocks in the Prepaleozoic increased mineralization of the hydrosphere.
- (3) An intensive development of flora in the Upper Precambrian and specially in the Lower Paleozoic period decreased the content of carbon dioxide in the atmosphere that in turn decreased the solubility of metals and caused their precipitation.
- (4) In the Lower Cambrian and specially in the Ordovician the transgression taking place favoured the accumulation of metals and phosphorus in the shallow-waters formed.

Black shale deposits of the third and fourth types have been characterized in the book "Types of uranium accumulation in Lower Paleozoic and Upper Proterozoic black shales and hypotheses of their formation" by M. Althausen (1979, Moscow; in Russian).

Reserves of Upper Proterozoic and Lower Paleozoic black shales are enormous. On the territory of the former Soviet Union the reserves of uranium contained in black shales are estimated at 50 million tonnes. The potential reserves of uranium in the Baltic basin are approximately 5 million tonnes, those of molybdenum 10 million tonnes. Among the respective world indices, these are substantial.

After establishing uranium in Estonian dictyonema shale in spring 1945, a high-level meeting attended by L. Beria, K. Voroshilov, G. Malenkov, Academician P. Kapitza, M. Althausen and some other members of the Soviet Government, as well as leading scientists took place in the Kremlin, Moscow. Problems of uranium production from Estonian dictyonema shale were discussed. The samples of dictyonema shale and uranium concentrate obtained were demonstrated.

Research works on the separation of metals from dictyonema shale were carried out, of which, the following were of interest:

- (1) The autoclaving-based technology developed in the Moscow Institute of Chemical Technology under the direction of Academician B. Laskorin.
- (2) The biochemical technology developed in the Institute of Mineral Resources in Moscow.
- (3) The combined power-hydrometallurgical technology developed in the Estonian Academy of Sciences.

The environmental hazard of Estonian dictyonema shale due to the mining of phosphorites must be taken into account in its more complex and rational utilization.

Представил Э. Липпмаа

Поступила в редакцию

30.04.92

Presented by E. Lippmaa

Received 30 April 1992