

ПРИРОДА

№ 4, 2000 г.

Н.И. Горячкин, В.Л. Хорошилов

Видимый свет невидимого золота

(с) “Природа”

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!

<http://www.accessnet.ru/vivovoco>

Видимый свет невидимого золота

Н.И.Горячкин, В.Л.Хорошилов

Неповторимый внешний вид в сочетании с природной редкостью всегда привлекал к золоту внимание человека. Незабываемый солнечный цвет, нетускнеющий блеск, благородная чистота и надменная яркость сделали его идолом богатства, могущества и благополучия. Отношение людей к этому 79-му элементу периодической таблицы сводится к маниакальному стремлению владеть им. Но чтобы “владеть золотом”, его сперва необходимо добыть. С прогрессом науки и техники изменялись как способы добычи золота, так и методы изучения свойств, определения количеств и форм его вхождения в состав горных пород, руд и минералов. Одному из новых способов изучения золота в горных породах посвящена эта работа. Однако, чтобы лучше понять сущность нового метода, нужно иметь представление о некоторых общеизвестных, традиционных.

Визуальные методы исследования

Самые древние методы изучения пород и руд — оптические. Во все века исследователь вперял пыливый взор в объект своего внимания, дабы осмыслить детали его строения. По мере то-



***Николай Игоревич Горячкин**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории пассивных окраин Института литосферы РАН. Область научных интересов — благородные металлы в черных сланцах, применение физических методов исследования в геологии. Неоднократно публиковался в “Природе”.*



***Владимир Леонидович Хорошилов**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник той же лаборатории. Занимается геохимией благородных металлов и нейтронно-активационными методами анализа минерального вещества.*

© Н.И.Горячкин, В.Л.Хорошилов

го как свет знаний освещал пути прогресса, око ученого оснащалось всякого рода увеличительными стеклами, зрительными трубами и прочими приспособлениями, усиливающими и облегчающими наблюдение в видимой части спектра электромагнитных излучений. Венцом совершенствования оптической техники для геологических наук стало создание поляризационных микроскопов проходящего и отраженного света, использование которых сделало возможным применение петрографических и минераграфических методов исследования.

Однако исследования, основанные только на определении оптических констант объектов и не характеризующие в должной мере их состав, скоро перестали удовлетворять любознательных геологов. Это повлекло за собой бурное развитие химических, физико-химических, ядерно-физических и иных способов изучения вещества. Все они обладают достоинствами и недостатками, в большей или меньшей степени характеризуют определенные аспекты строения пород и минералов. Порой эти методы рождаются на стыках весьма отдаленных друг от друга наук...

Как уже было сказано, сияние золота спутать ни с чем невозможно. Однако это верно лишь отчасти — в тех случаях, когда золота много и оно находится в достаточно крупных обособлениях. Но золото потому и ценится так высоко, что встречается чрезвычайно редко. Кроме того, даже в богатых рудах оно может присутствовать в виде мельчайшей тонкодисперсной пыли, различаемой лишь под микроскопом. Геологи знают, что “видимое золото” в руде, не говоря уже о самородках, — явление весьма нечастое. Так что при исследованиях руд о “блеске злата” говорить, как правило, не приходится. При изучении таких руд буквально идет охота за мельчайшими (от десятых до тысячных долей миллиметра) выделениями этого металла. Необходимо точно определить, с какими микро- и макроструктура-

ми пород золото связано, с какими минералами сростается, сколько его в образце. Часть этих задач можно решить с помощью оптического микроскопа. Это длительная, утомительная работа, в огромной мере зависящая от опыта исследователя, его настроения, внимания. Но есть вещи, недоступные оптическому микроскопу. Например, нет гарантии, что исследователь обнаружит все выделения золота в препарате. При микроскопических работах применяются так называемые шлифы — полированные пластины, изготовленные из пород, поверхность которых исследуется в отраженных лучах, либо очень тонкие прозрачные срезы, сквозь которые проходит свет. Золото же в глубине полированного шлифа остается незафиксированным.

В дополнение к классическим методам оптической микроскопии сегодня приходят различные электронные микроскопы и микронзонды, позволяющие получать увеличения во многие тысячи крат, определять химический состав минералов¹. Но в этой работе мы рассмотрим иной способ сделать видимым блеск “невидимого золота”.

Нейтронно-активационная автордиография золота

Истоки нейтронно-активационного анализа берут свое начало с открытия Ф.Жолио и И.Кюри в 1933 г. наведенной, или искусственной радиоактивности. Применительно к благородным элементам нейтронно-автордиографический метод разработан в 80-е годы в Институте ядерной физики АН Узбекистана² и успешно применяется нами в практике геохимических исследований.

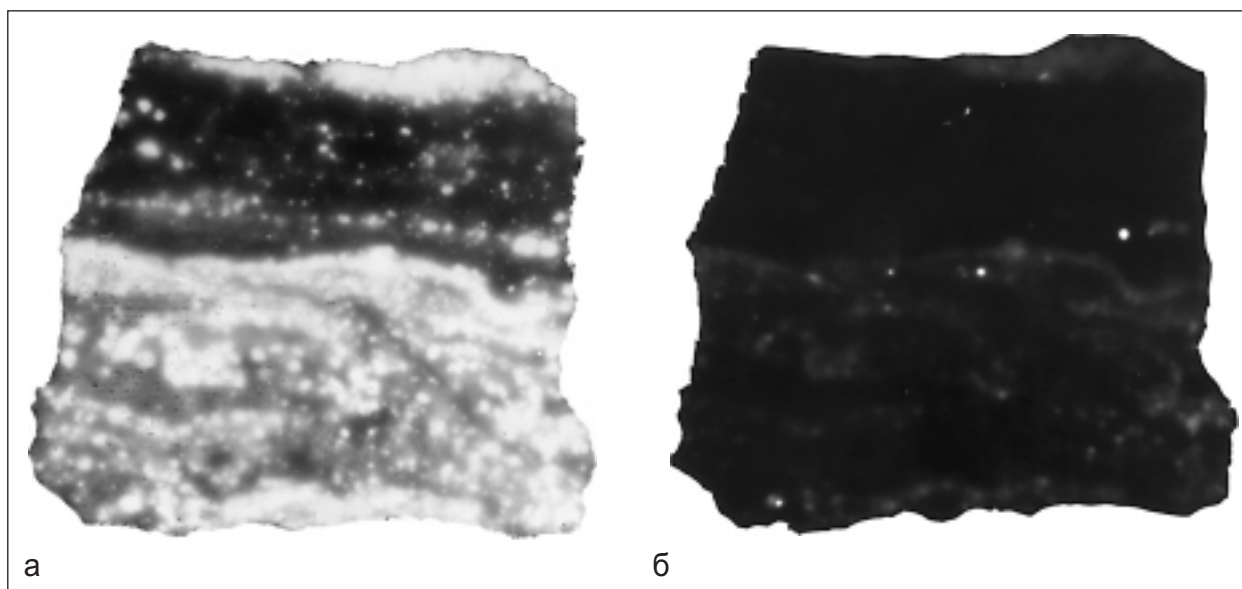
¹ Созинов Н.А., Горячкин Н.И., Ермолаев Н.Р., Чиченов В.А., Хорошилов В.Л. Платиноиды в черных сланцах // Природа. 1997. №8. С.11—17.

Метод основан на способности (открытой еще Беккерелем) ионизирующих излучений засвечивать фотоэмульсию.

Поток нейтронов малых энергий, или “тепловых нейтронов” (энергии которых недостаточно для разрушения атомных ядер), взаимодействует с ядрами атомов большинства химических элементов. При этом протекает реакция “радиационного захвата”, при которой ядро-мишень переходит в форму нестабильного изотопа. Последний через определенное, характерное именно для данного изотопа время распадается, испуская ионизирующее излучение. Именно эта “выдержка” делает возможным извлечение препаратов из реактора, где они облучались нейтронами, и помещение их в детектор для фиксации процесса распада. В практике геохимических исследований используется валовый нейтронно-активационный анализ, позволяющий по спектру излучения, испускаемого препаратом, определять содержание в нем многих элементов.

Породы и руды — объекты внимания геологов, минералогов и геохимиков — представляют собой сложнейшие химические системы, включающие в свой состав десятки элементов в виде самых причудливых минеральных соединений. В силу своей пресловутой редкости золото, как правило, не бывает доминирующим в природных минеральных системах, и его количество в самых богатейших рудах едва достигает нескольких массовых процентов. При облучении образца реальной породы или руды нейтронами воздействию подвергаются практически все химические элементы, входящие в его состав. Они дают мешающее излучение, которое может засвечивать эмульсию гораздо сильнее, чем незначительное количество содержащегося в препарате золота. Глав-

² Кист А.А., Саттаров Г.А., Флициян Е.С. // Геохимия. 1984. №11. С.1699—1710.



Нейтронно-активационная радиография руд главной генерации месторождения Кумтор. Облучение потоком реакторных нейтронов с флюенсом* $5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$: а — радиационное остывание 3 сут, суммарное засвечивание от всех элементов; б — радиационное остывание 9 сут, засветка только от золота. Увел. 2.

Здесь и далее фото Н.И.Горячкина

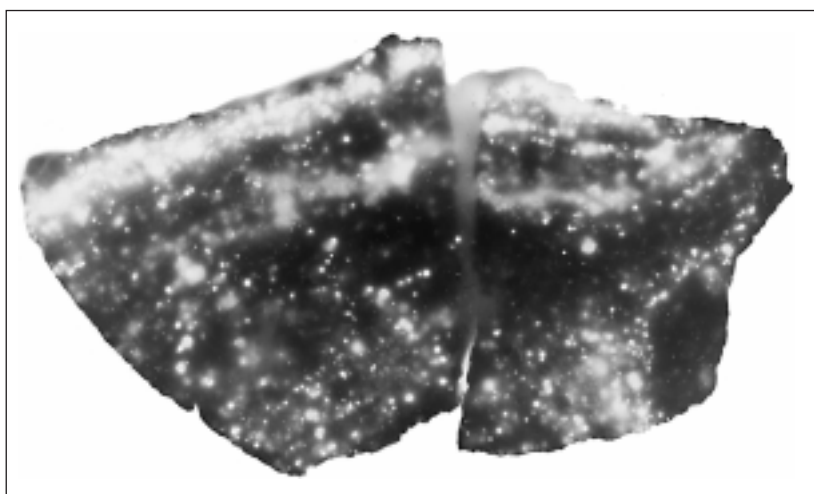
* Флюенс — отношение числа частиц, проникающих в элементарную сферу, к площади ее центрального сечения.

ная задача исследователя — создание условий, при которых на детектор воздействует излучение только от золота (разумеется при его наличии в образце). Для этого надо глубоко изучить процессы, происходящие со всеми элементами как в ходе их облучения нейтронами, так и впоследствии.

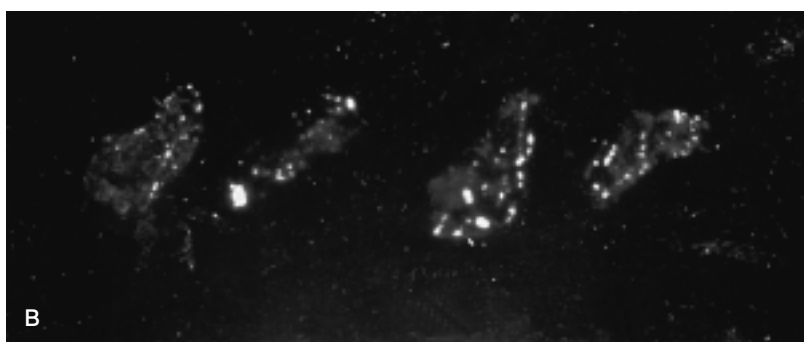
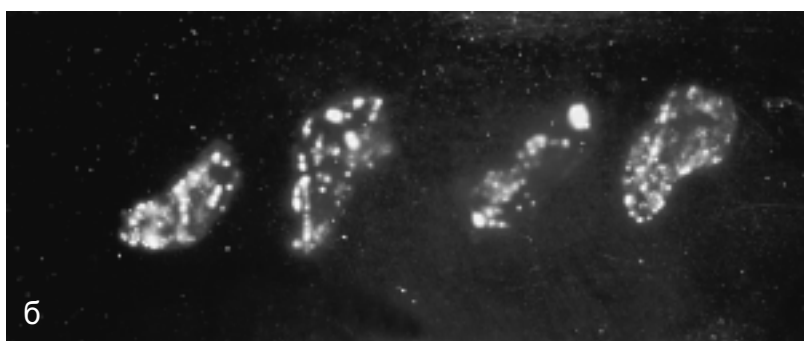
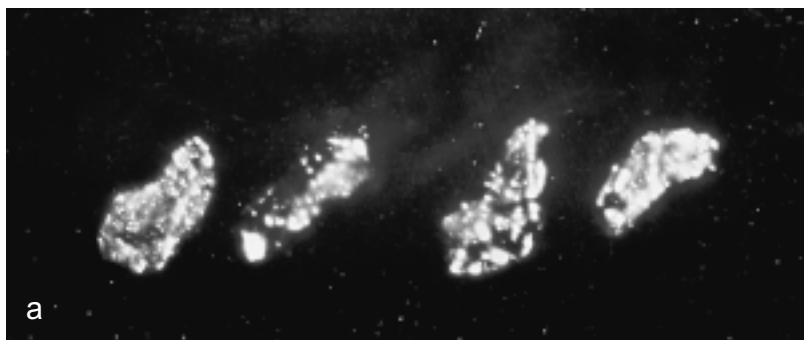
Золото — удобный объект для нейтронно-радиографического изучения. Оно обладает высокой способностью к активации под воздействием потока медленных нейтронов (или, как говорят, большим сечением ядерной реакции активации $^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$, составляющей

величину³ 96 барн). Иными словами, ядро стабильного природного изотопа ^{197}Au — “крупная мишень”, и захват им медленно-го нейтрона очень вероятен. При этом происходит испускание γ -кванта, стабильный изо-

топ ^{197}Au переходит в неста-



Нейтронно-активационная радиография золота из руды месторождения Кумтор. Содержание золота в образце 137 г/т. Флюенс $5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$. Радиационное остывание 9 сут. Яркие пятна — высокозолотистые минеральные фазы. Серые участки засвечивания — примесное золото в пирите. Увел. 3.6.



Нейтронно-активационные радиографии. Флюенс $5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$. Распад мешающих изотопов в препаратах в зависимости от времени радиационного остывания: а — радиационное остывание 3 сут, суммарная засветка фотодетектора; б — радиационное остывание 6 сут, частичный распад мешающих элементов; в — радиационное остывание 10 сут, засветка только от золота. Уменьш. 5.

бильный ^{198}Au . Этот изотоп в буквальном смысле слова долго не живет (период полураспада 2.7 сут) и превращается в изотоп ртути ^{198}Hg с испусканием β -частиц и γ -квантов. Слегка от-

влекаясь от темы, заметим, что здесь осуществляется “мечта

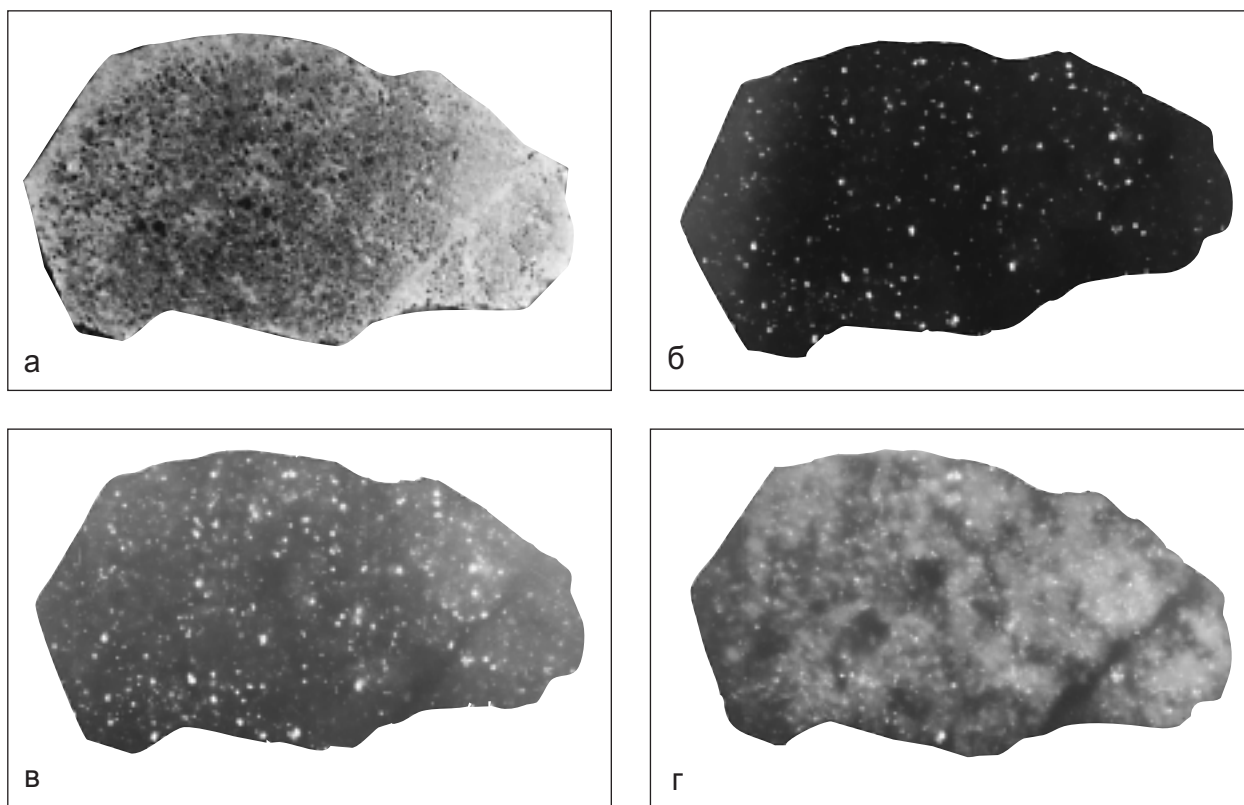
алхимиков — наоборот”, т.е. вместо получения золота из ртути под воздействием философского камня мы получаем ртуть из золота посредством атомного реактора.

Это свойство золота — осно-

³ 1 барн = 10^{-24}см^2 (это характерное значение геометрического сечения ядер).

вополагающее для радиографии, ибо именно излучение при его переходе в ртуть может быть зафиксировано детектором.

Однако, как уже отмечали выше, в препаратах активируются и другие элементы, которые могут “затмить” на фотодетекторе слабенький “свет радиоактивного золота”. Чтобы избавиться от их пагубного влияния приходится прибегать к определенным ухищрениям. Наибольшую “аналитическую опасность” представляют макроэлементы. В первую очередь необходимо подобрать такой режим облучения, при котором они активировались бы в минимальной степени. Экспериментально определено, что для оптимальной активации золота необходимо, чтобы на 1см^2 поверхности препарата попало 10^{13} — 10^{14} тепловых нейтронов. Это достаточно небольшая величина, при которой не происходит значительной активации таких элементов, как железо, скандий, сурьма, серебро. Для того чтобы избавиться от влияния натрия, входящего в состав породообразующего плагиоклаза, облучение препаратов в атомном реакторе производят, предварительно поместив их в кадмированный канал. Кадмий поглощает нейтроны, способные активировать натрий. Однако сера, мышьяк, вольфрам и тот же натрий (когда его очень много) все же активируются совместно с золотом и от их влияния необходимо избавляться. Для этого используют свойства тех радиоактивных изотопов, в которые превращаются данные элементы под воздействием нейтронов. Период полураспада для ^{24}Na составляет 14 ч, ^{187}W — 24 ч, ^{76}As — 26 ч, что значительно меньше, чем для ^{198}Au (2.7 сут). Таким образом, варьируя время “радиационного остывания” препарата (т.е. выдержку его после облучения и до проведения радиографии), можно дожидаться, когда мешающие элементы распадутся, а золото еще будет “светить” достаточно ярко. Используя эту разницу, можно получить “чистые” радио-



Образец золота, содержащий различные формы вольфрама: а — исходный; б — радиолуминесценция выделений шеелита (CaWO_4); в — нейтронно-активационная радиография всех форм золота и макрокonzентраций вольфрама (после облучения в контейнере с вольфрамовой стенкой); г — нейтронно-активационная радиография всех форм нахождения золота и вольфрама.

графии золота на четвертые—десятые сутки после облучения.

Для отделения фона от вольфрама, часто содержащегося в образцах в виде шеелита (CaWO_4), в ИЯФе Узбекистана разработан метод, основанный на способности этого минерала к радиолуминесценции (т.е. остаточному свечению после воздействия γ -излучения). Препарат

сначала облучают мощным потоком γ -квантов и сразу же делают радиографию, фиксирующую вольфрам шеелита. Далее препарат, заключенный в контейнер из вольфрамовой фольги, облучают тепловыми нейтронами, которые не активируют

рассеянный вольфрам, но и не мешают активации золота и основного (шеелитового) вольфрама. Наконец, препарат снова облучают потоком нейтронов, и выполняется третья радиография, фиксирующая все формы вольфрама и золото. Сопоставление полученных радиографий позволяет определить распределение последнего в препарате.

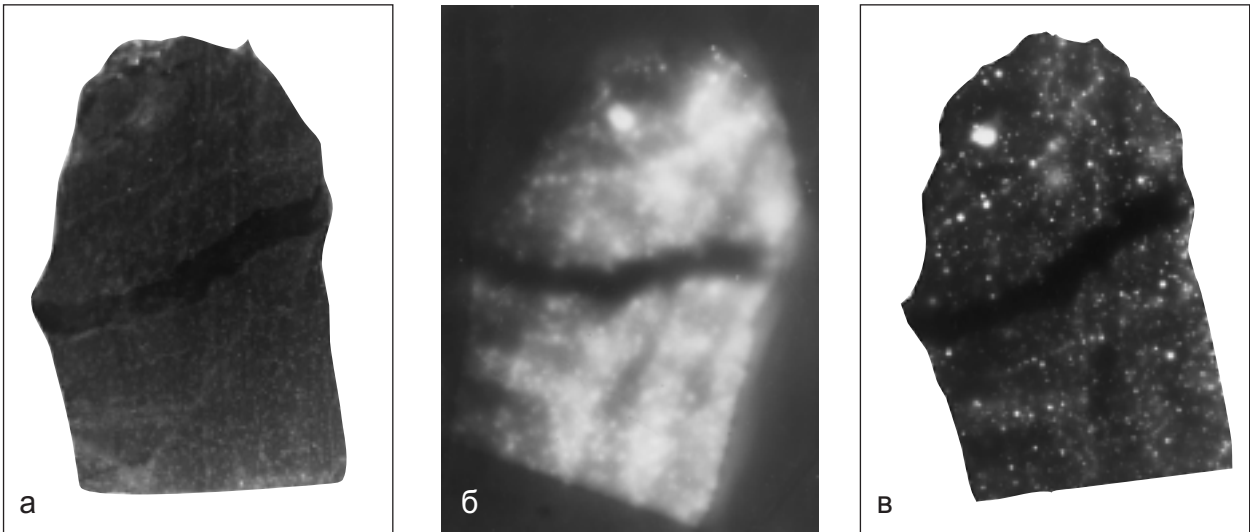
Для борьбы с влиянием серы при исследовании образцов, содержащих сульфидные минералы (пирит, пирротин и т.п.), используется еще более изощренный способ. Получение радиоактивной серы в реакции $^{34}\text{S} (n, \gamma)$

^{35}S сопровождается последующим β -излучением ^{35}S , переходя-

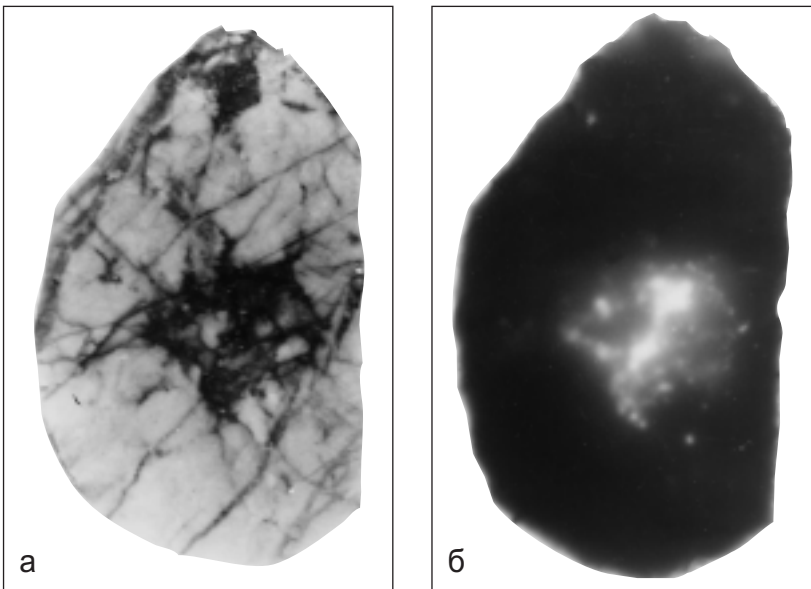
щей в стабильный изотоп ^{35}Cl . Сера характеризуется слабой способностью к активации тепловыми нейтронами (0.26 барн), но при значительных концентрациях способна полностью затенить золото. Кроме того, период полураспада ^{35}S составляет 87 сут, что не позволяет воспользоваться радиационным остыванием образцов. Если изотоп ^{198}Au испускает γ - и β -излучение, то

^{35}S — только β , характеризующееся, по сравнению с γ -излучением, пониженной проникающей способностью. Средняя длина пробега β -частиц в алюминии со-

составляет 0.01 см, что позволяет использовать радиографию для выявления вольфрама в золоте.



Углеродисто-слюдистый алевролит с дисперсным пиритом (месторождение Мурунтау): а — исходный образец (темное — прожилок кварца); б — нейтронно-активационная радиография после облучения потоком с флюенсом $2 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$. Излучение примеси мышьяка погашено предварительной выдержкой 11 сут. Наблюдается совместное засвечивание фотозмюльсии радиоактивной серой и золотом; в — то же, но излучение серы снято алюминиевым экраном. Наблюдается рассеянное золото (ранняя генерация оруденения) и отдельная обособленная золоти́на (яркое белое пятно) более позднего этапа рудообразования. Увел. 3.5.



Распределение минералов серебра (тетраэдрит и другие сульфосоли) в жильном кварце: а — исходный образец; б — нейтронно-активационная радиография. Флюенс $7 \cdot 10^{18} \text{см}^{-2}$. Радиационное остывание 2.5 г. Увел. 5.

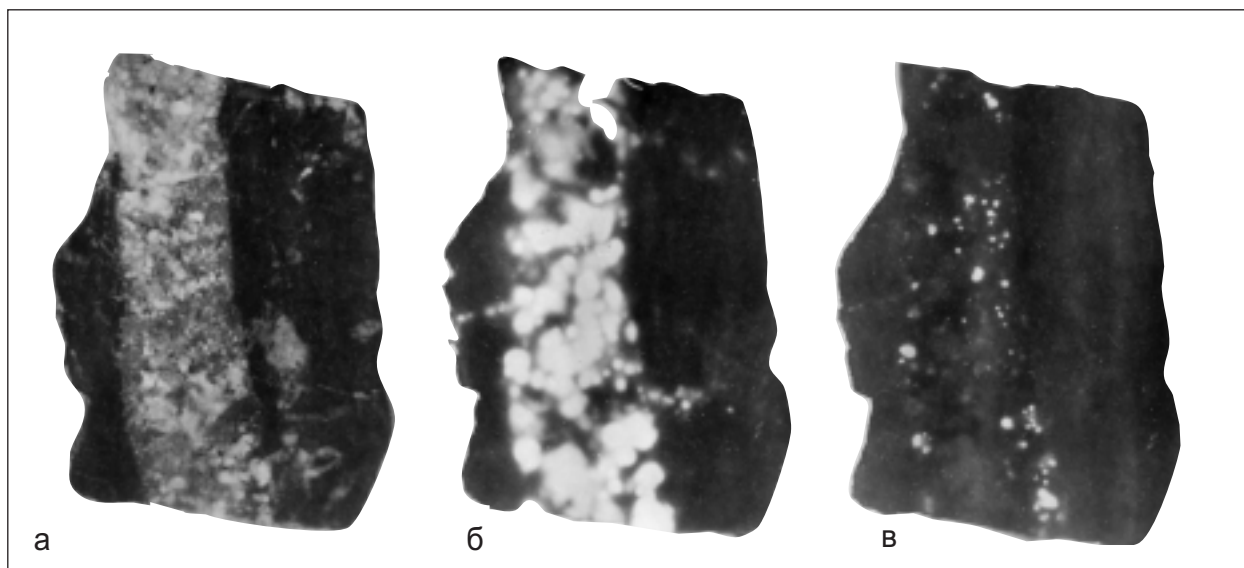
ставляет 80 мкм. Таким образом, экранирование облученного препарата при проведении радиографии в момент фотоэкспозиции алюминиевой фольгой толщиной 100 мкм полностью отсекает излучение серы, а γ -лучи от

^{198}Au этот экран свободно преодолевают.

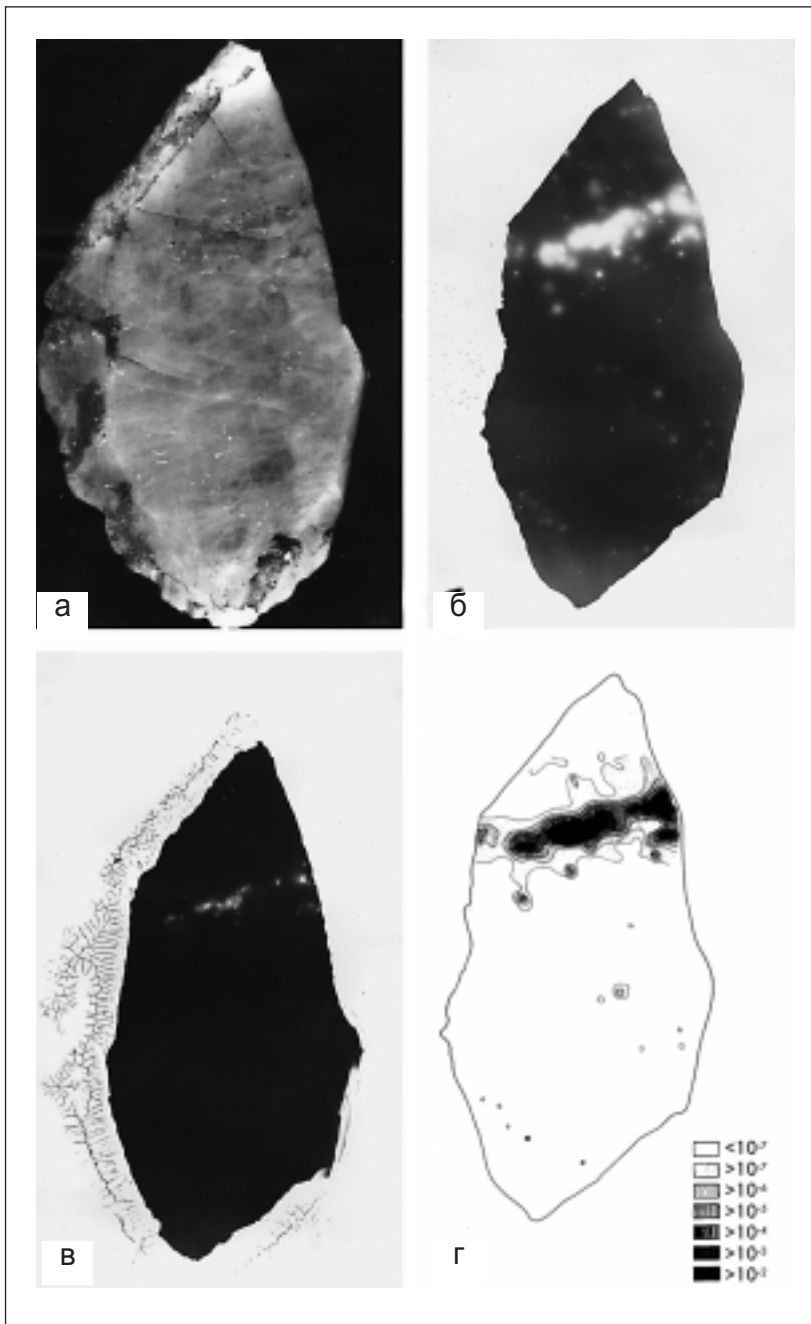
Что касается прочих радиоактивных изотопов, образующихся при облучении препаратов горных пород и руд (например, ^{46}Sc , ^{59}Fe , ^{122}Sb , ^{110}Ag), то используемые для активации золота интегральные потоки 10^{13} — 10^{14} нейтронов на 1см^2 недостаточны для возбуждения многих нуклидов, и их присутствие не мешает главной аналитической цели.

Итак, образцы в виде пластин толщиной 4—5 мм помещают в ядерный реактор и облучают потоком тепловых нейтронов. При этом используется весь комплекс мер для подавления активации мешающих элементов. После извлечения из реактора пробы выдержива-

Высокогорное плато Ак-Шыйрак (4000 м над ур.м.) в 50 км от курортов Иссык-Куля. Климат соответствует климату новоземельской тундры. На втором плане видна горная гряда, под которой расположено месторождение Кумтор.



Золотая руда месторождения Кумтор: а — исходный образец: черное — вмещающая порода (углеродистый алевролит), серое — минералы, выполняющие прожилки. Радиографии после облучения потоком нейтронов и радиационного остывания 6 сут: б — флюенс 10^{14}см^{-2} , светлое — сигналы от всего золота, имеющегося в образце; в — флюенс 10^{13}см^{-2} , примесного золота мало, светлые точки — выделение самородного золота. Увел. 3.



Золото-кварцевые руды Мурунтау: а — исходный образец; б — радиография после облучения потоком с флюенсом 10^{14}см^{-2} . Проявлены разобщенные микроконцентрации золота от 10^{-7} до 10^{-5} г (светлые участки), группирующиеся в зоне трещинки в видимые (10^{-3} , 10^{-2} г) золотины (контрастные белые точки); в — флюенс 10^{13}см^{-2} . Проявлены только видимые золотины; г — распределение микроконцентраций золота на основе данных микрофотометрирования.

ются в специальных условиях не менее 4—10 сут, чтобы их радиационное остывание достигло безопасного уровня. Далее препараты помещают на фотопленку и выдерживают определенное время. После обычной фотообработки изображение на пленке сравнивают с препаратом, что позволяет судить о распределении золота на поверхности. При анализе образец не разрушается и может в дальнейшем исследоваться любыми другими способами.

Надо сказать, нейтронно-активационная автордиография применима не только при определении золота. Нами она успешно используется для фиксации серебра, вольфрама и некоторых других редких элементов. Основы метода те же, но время облучения, остывания или фотоэкспонирования иное.

Автордиография золота в геологической практике

Примером использования нейтронно-радиационных автордиографий золота для исследований стадийности рудообразования служат наши работы по месторождениям Кумтор и Мурунтау. Изучая конкретные образцы, мы смогли оценить распределение различных форм золота в рудах данных типов.

Кумтор — крупнейшее месторождение Киргизии — расположено на высокогорном плато Ак-Шыйрак (4000 м над ур.м.), в 50 км южнее оз.Иссык-Куль. Золоторудная залежь располагается в высокоуглеродистых сланцевых породах докембрийского возраста. Руды представлены сложными кварц-алюмосиликатно-сульфидными агрегатами, образовавшимися в ходе сложных и многоэтапных геохимических процессов.

Облучение препаратов нейтронами выполнялось на реакторе в двух режимах: потоками нейтронов с плотностью $3 \cdot 10^{14}$ и

10^{13} см⁻². При первом режиме на детекторе фиксируется все золото в образце. При облучении потоком нейтронов в 30 раз меньшим можно наблюдать примесное золото, входящее в структуру пирита и других минералов (слабо засвеченные участки), и золото, локализованное в виде собственных минералов (яркие пятна). Исследование таких радиографий по специальной методике (микрофотометрированию), позволяющей количественно оценить степень почернения фотопленки в зависимости от концентрации золота, дает возможность определить соотношение количеств золота в примесной и минеральной формах для руд различных типов (например, 98:2 для субпластовых и 44:56 для штокверковых руд).

Золоторудное месторождение **Мурунтау**, расположенное в центре Кызылкумской пустыни, — одно из крупнейших в мире. Несмотря на то что руды разрабатываются уже не первое десятилетие, изучение их состава, происхождения и свойств еще далеко не закончено. Радиографический анализ оказывает заметную помощь в выяснении закономерностей перегруппировки рудного вещества в ходе рудообразования.

Можно выделить два главных этапа рудообразования: метаморфогенный и гидротермальный. В первый происходит формирование ранних послонных метасоматитов и связанных с ними убогих руд, во второй — становление главной рудоносной жильно-штокверковой структуры, секущей по отношению к ранним послонным рудам.

Процессы перегруппировки золота здесь прекрасно иллюстрируются изменением соотношений золота и кварца в рудах различных генераций. Отмечается перераспределение дисперсного золота при окварцевании обломков ранних рудоносных пород (кварц-алюмосиликатных метасоматитов). Локальная миграция золота в поздний жильный кварц сопровождается группировкой

металла и его “слипанием” в более крупные выделения. По степени почернения радиографий рассчитываются микроконцентрации золота в различных участках препарата.

Статистический обсчет концентраций золота рудного поля месторождения выполнялся для вмещающих пород, ранних руд (кварц-гидробиотитовых с эпидотом) и поздних (кварц-анкеритовых). Результаты этого исследования показывают, что на месторождении концентрация золота ступенчато изменяется от первичного геохимического фона до 10-кратного повышения в зонах разрывных нарушений. Затем происходит увеличение содержания в 100—150 раз. Причем золото распределяется в рудах еще более неравномерно. Интересно, что руда с более высокой концентрацией золота наследует содержание более бедных разностей⁴. Так, в зоне развития “стержневых” жил с видимым золотом (тысячи г/т) сохраняются следы контрастных (десятки г/т) и убогих (1 г/т) руд.

* * *

Мы рассмотрели некоторые возможности одного из методов исследования неживой материи, лежащего на границе нескольких наук. Метод трудоемкий, требующий больших материальных затрат, сложного оборудования, творческого труда многих специалистов высочайшей квалификации. Все это безусловно выводит его за рамки общедоступных исследований, особенно в наше непростое время. Однако хочется надеяться, что оригинальность получаемых результатов будет постоянно привлекать к нему геохимиков и минералогов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Грант 98-05-65081. ■

⁴Ермолаев Н.П., Созинов Н.А. Стратиформное рудообразование в черных сланцах. М., 1986; Ермолаев Н.П., Созинов Н.А., Флициян Е.С. и др. Новые вещественные типы руд благородных и редких элементов в углеродистых сланцах. М., 1992.