

ORE FORMATION IN THE OCEANS

V. I. SOTNIKOV

World ocean is a major potential source of mineral resources. The processes of the formation of ore concentrations at an oceanic floor at the expense of removal of ore components from the continents, their adoption from sea water, and deep entrance in the areas of volcanic and hydrothermal activity are considered.

Мировой океан – важнейший потенциальный источник полезных ископаемых. Рассматриваются процессы формирования рудных концентраций на дне океанов: за счет сноса рудных компонентов с континентов, заимствования их из морской воды и глубинного поступления в областях вулканической и гидротермальной деятельности.

РУДООБРАЗОВАНИЕ В ОКЕАНАХ

В. И. СОТНИКОВ

Новосибирский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Минеральные ресурсы континентов, за счет которых до последнего времени удовлетворяются основные потребности человечества, ограничены. Месторождения полезных ископаемых постепенно истощаются, их эксплуатация становится все более сложной и дорогостоящей, вероятность обнаружения на континентах новых месторождений уменьшается. Вместе с тем в последние десятилетия было установлено, что дно морей и океанов располагает огромными ресурсами полезных ископаемых, которые уже успешно эксплуатируются в прибрежных районах Мирового океана [1]. Среди рудных полезных ископаемых в океанах выделяются следующие типы: 1) гидротермальные сульфидные постройки на поверхности океанического дна, 2) сульфидная минерализация в толще океанической коры (придонные образования), 3) железо-марганцевые конкреции на дне глубоководных впадин, 4) металлоносные осадки открытого океана, 5) прибрежно-морские россыпи.

СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СУЛЬФИДНЫЕ ПОСТРОЙКИ

Обнаружение в рифтовых зонах океана – узких провалах дна, вытянутых на сотни километров и образованных в результате растяжения океанической коры, – высокотемпературных рудоносных растворов, выходящих на поверхность дна и формирующих сульфидные залежи, является одним из крупнейших открытий современной геологии [2]. Средние глубины океанских рифтов составляют 2700–2900 м. Широко известный Галапагосский рифт, где впервые в Тихом океане была обнаружена современная подводная гидротермальная деятельность, имеет глубину 2450 м при ширине 3–4 км, стенки рифтовой долины возвышаются над ее дном на 200–250 м. Глубина океана в рифтовых зонах Срединно-Атлантического хребта достигает 3650–3700 м. Осевой рифт Красного моря имеет глубину 1700–1900 м, а дно рифтовой впадины Гуаймас в Калифорнийском заливе находится на глубине 2000–2300 м. В рифтовых зонах происходит постоянный подъем к поверхности расплавленного мантийного вещества, обеспечивающего высокий тепловой поток. Океанская вода по трещинам проникает в твердый материал коры, взаимодействует с ней при высоких температурах и, выщелачивая рудные элементы из базальтов – вулканических пород, покрывающих дно океана, становится рудоносной. Горячие растворы, поднимающиеся к поверхности, смешиваются с

холодной океанской водой, при этом многие химические элементы выпадают в твердую фазу. Большая часть их фиксируется в виде взвешенных частиц, которые скапливаются у устья подводного гидротермального источника, а затем придонными течениями разносятся на большие расстояния и, осаждаясь на дне, становятся металлоносными осадками.

Выходящие на поверхность дна гидротермальные источники имеют температуру до 250–350°C. Скорость выхода растворов на поверхность достигает 0,5–2 м/с. Непосредственно у выхода образуются крупные (высотой до нескольких десятков метров) гидротермальные постройки, имеющие форму башен, конусов, труб или столбов (рис. 1). Многие из действующих в настоящее время источников называются “черными курильщиками”, так как у выхода гидротермальных растворов из постройки образуется густая черная взвесь, состоящая из тонкодисперсных частиц рудных минералов. Постройки часто сложены массивными скоплениями сульфидов, среди которых преобладают пирит (FeS_2), пирротин (Fe_{1-x}S), сфалерит (ZnS), халькопирит (CuFeS_2). Нередко отмечаются высокие содержания Ag, Au, Tl, Cd. Концентрации рудных элементов часто достигают промышленных количеств: содержание Zn колеблется от 0,2 до 50%, Cu – от 0,2 до 20% и более. Размеры гидротермальных полей с сульфидными постройками достигают нескольких квадратных километров, а сконцентрированные в них запасы металлов оцениваются миллионами тонн.

Гидротермальные поля служат местом обитания разнообразных живых организмов. Так, рядом с местами разгрузки гидротерм обнаружены черви из рода *Riftia*, живущие в симбиозе с сульфидоокисляющими бактериями. Вблизи этих мест наблюдаются также скопления рыб (*Diplacanthopoma*), белого краба (*Bythogradia*), морского анемона (*Actiniazia*). Около гидротерм возникают настоящие оазисы жизни, в которых биомасса достигает сотен кило-

граммов на 1 м². Здесь обнаружены многие неизвестные ранее виды живых организмов, существующие при повышенных температурах и в среде, резко обогащенной сероводородом.

Одними из хорошо изученных являются гидротермальные образования Галапагосского рифта [3]. Наиболее крупное из исследованных здесь сульфидных скоплений представляет собой линейную систему гидротермальных труб (часто сросшихся) высотой до 35 м и шириной свыше 20 м, прослеженной на расстоянии около 500 м. Сульфидная постройка сформировалась на осыпи базальтовых обломков вследствие поступления гидротермальных растворов по трещинам вдоль крупного разлома в океанической коре. Среди сульфидных минералов преобладают халькопирит и пирит при небольшом количестве сфалерита. Содержание Fe достигает 31%, Cu – 27%, Zn – 1,5%. Наибольшие содержания меди наблюдались в верхних частях гидротермальных труб. Наряду с сульфидными в значительных количествах встречается аморфный кремнезем. В качестве элементов-примесей присутствуют Cd, Hg, Ni, Sn, W, U, V, Ag, Au. Постоянно встречаются остатки червей *Riftia*, замещенные сульфидами. Время формирования сульфидных образований составляет от нескольких десятилетий до сотен лет.

На удалении от сульфидной постройки обнаружены поля многочисленных гидротермальных холмиков (высотой от 1 до 20 м, диаметром в основании от 20 до 50 м), сложенные осадочным материалом, переслаивающимся с гидротермальным веществом. Содержание рудных компонентов в холмиках незначительное. В Галапагосском рифте встречены также поля с гидротермальными трубами, практически полностью состоящими из аморфного кремнезема и напоминающими губки или пчелиные соты с многочисленными пустотами и кавернами. Изучение изотопного состава кислорода показало,



Рис. 1. Морфология высокотемпературных гидротермальных сульфидных построек [2]

что кремнезем отлагался из раствора при температуре 32–42°C.

РУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫЕ ПОД ДНОМ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Рудные месторождения, залегающие ниже уровня морского дна, представлены двумя типами. В одних случаях это те же рудные проявления, которые известны и в прибрежных районах. Примером подобной минерализации являются оловянные руды, залегающие на некотором удалении от мыса Корнуолл в Англии. Здесь в море продолжают оловосодержащие рудные жилы, которые иногда разрабатывались шахтами с суши. Предполагается, что цепочка таких рудных образований уходит в море на 160 км.

Второй тип оруденения связан с проявлением вулканизма. В подводных базальтах установлена минерализация трех разновидностей [4]: сульфидные капли (глобулы) в базальтовом стекле; скопления рудных минералов в газовых полостях; минералы в трещинах контракции (трещинах, возникающих за счет уменьшения объема магматической породы при ее охлаждении после образования). Сульфидные глобулы размером от нескольких до 200–300 микрон обычно представляют собой шары с резкими границами на контакте с базальтовым стеклом. Реже встречаются сульфидные выделения каплевидной и уплощенной формы, образовавшиеся в процессе течения магматического расплава. В составе глобул присутствуют моносльфидный твердый раствор (Fe, Ni, Cu), пентландит (FeNi)₉S₃, кубанит (FeCu₂S₃), пирротин. Рудные образования в газовых полостях базальтового стекла представлены кристаллами, шаровидными и каплевидными выделениями. Здесь отмечается наибольшее разнообразие минералов: пентландит, аварит FeNi, пирротин, халькопирит, пирит, ильменит FeTiO₃, кубанит, самородные Fe, Ag и Zn. В трещинах контракции чаще встречаются халькопирит, кубанит, пирротин, самородные Fe и Ag. Формы выделений рудных минералов обычно неправильные, комковатые.

Образование сульфидных глобул в стеклах связывается с существованием в силикатном базальтовом расплаве капель несмешиваемой сульфидной жидкости. Базальтовый расплав образовался в результате частичного плавления мантийного вещества на глубинах от 30 до 100 км ниже уровня океанского дна. Формирование рудной минерализации в газовых полостях и трещинах контракции связано с отделением от силикатного расплава флюидов, обогащенных рудными компонентами. Рудная минерализация в базальтах океанов близка к сульфидному оруденению на медно-никелевых месторождениях, расположенных на суше, — Садбери в Канаде, Норильское в России.

ЖЕЛЕЗО-МАРГАНЦЕВЫЕ КОНКРЕЦИИ

Глубоководные Fe-Mn-конкреции впервые были изучены во время экспедиции на “Челленджере” в 1873–1876 годах. С того времени их исследование проводилось со всевозрастающей интенсивностью. Fe-Mn-конкреции представляют собой стяжения гидроокислов железа и марганца, образующиеся на дне современных водоемов (океанов, морей, озер). Размеры их от 0,01 мм до десятков сантиметров. Наиболее активно конкреции формируются в пелагических районах океанов (открытые, удаленные от суши области океана, где на больших глубинах наименее сказывается влияние суши на протекающие здесь процессы осадкообразования; в эти области поступает мало терригенно-обломочного материала). В таких районах конкреции покрывают огромные пространства дна. Так, в отдельных частях Индийского океана объем конкреций составляет от 4 до 10 тыс. т на 1 км².

Обычно конкреции содержат ядро, сложенное каким-либо инородным телом (часто это обломки вулканических пород), которое окаймлено оболочкой Fe-Mn-оксидов. По морфологии конкреции очень разнообразны: это сферические, эллипсоидальные, уплощенные, таблитчатые, полигональные, бугорковидные и более сложные образования (рис. 2). Железо-марганцевые минералы образуют налеты, агглютинации (грозди ядер, покрытые тонкой инкрустацией Fe-Mn-оксидов), конкреции и корки. Эти различные формы выделений часто переходят друг в друга. По структуре поверхности конкреции обычно представляют сосковидные образования (полусферические выступы), которые иногда осложнены маленькими бугорками, или “гусиной кожей”. На поверхности конкреций микроскопическими исследованиями выявляется обилие органогенных структур (например, бентосных — донных фораминифер рода *Saccorhiza*, которые в



Рис. 2. Морфология сложно построенной железо-марганцевой конкреции из Тихого океана. 1/10 натуральной величины. Фото В.А. Акимцева

процессе создания своей трубчатой раковины аглютинируют Fe-Mn-микрোকонкреции).

Одним из основных факторов, определяющих морфологию Fe-Mn-конкреций, является способ привноса элементов при их построении, которые могут поступать как из придонной морской воды, так и из нижележащих иловых вод (рис. 3). В конкреции, образующиеся в глубоководных районах и находящиеся под воздействием течений, металлы поступают из морской воды. Они становятся изометричными в результате перекачивания на дне. В мелководных районах значительную роль играет поступление элементов из иловых вод, при этом Mn, мигрирующий снизу, отклоняется к краевым частям ядер – формируются дисковидные конкреции. На верхней стороне таких ядер развиваются тонкие окисные пленки за счет элементов, осаждающихся из наддонных вод. На форму конкреций оказывает влияние также конфигурация ядер.

Основными металлами в конкрециях являются Mn (среднее содержание – 27,5%), Ni (1,26%), Cu (1,03%) и Co (0,25%), имеются также Mo, Zn, Pb, редкоземельные элементы. Потенциальные запасы металлов на некоторых площадях распространения конкреций в экваториальной зоне Тихого океана оцениваются в 6000 млн т Mn, Ni – 300 млн, Cu – 250 млн, Co – 100 млн т [1]. Если только 10% конкреций, залегающих на дне Мирового океана, оказались бы экономически выгодными для разработки, то запасов металлов в них хватило бы на сотни лет при современном уровне потребления. При этом следует учесть, что скорость накопления металлов в Fe-Mn-конкрециях на обширной площади Мирового океана превышает темпы их потребления промышленностью, то есть конкреции являются возобновляемым минеральным сырьем.

Конкреции содержат большой набор минералов Fe и Mn, обычно очень тонкозернистых и прорастающих друг в друга. Из марганцевых минералов чаще встречаются тодорокит ($Mn^{4+}, Mn^{2+}_5O_{12} \cdot (Ca, Mg, Ba)_2(H_2O)_3$), бёрнессит ($Mn^{4+}, Mn^{2+}_5O_{10} \cdot (Ca, Mg, Na, K)_{\leq 2}$ и δMnO_2). Реже отмечаются пиролюзит MnO_2 и псиломелан ($Mn^{4+}, Mn^{2+}_5O_{10} \cdot (Ba, H_2O)_{\leq 2}$).

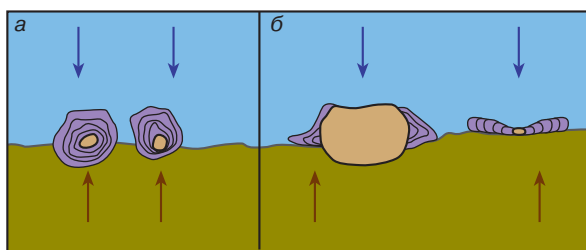


Рис. 3. Морфология железо-марганцевых конкреций в зависимости от характера привноса металлов [1]: а – доминирует привнос из морской воды, б – преобладает привнос из иловых вод

Железо содержится в основном в смеси гетита $\alpha\text{-FeOOH}$ и лепидокрокита $\gamma\text{-FeOOH}$, а также в аморфном веществе. Конкреции, обогащенные Ni и Cu, почти всегда содержат тодорокит в качестве главной минеральной фазы.

Наиболее важным условием подводной аккумуляции Fe-Mn-оксидов в виде конкреций является высокая степень окисления рудообразующей среды (до уровня, когда происходит окисление Mn^{2+} до Mn^{4+} и формирование MnO_2). Для зарождения конкреций необходимо подходящее ядро, которое может обростать Fe-Mn-оксидами. Так как во многих случаях ядра состоят из обломков вулканических пород, то массовое формирование конкреций часто происходит в областях подводного вулканизма, которые также близки к магматическому источнику металлов. Важным условием, определяющим распространение конкреций на морском дне, является скорость накопления ассоциирующихся с ними осадков. Низкие скорости более благоприятны для развития конкреций, тогда как при быстром осадконакоплении потенциальные ядра (или эмбриональные конкреции) могут быть захоронены раньше, чем произойдет достаточное накопление Fe и Mn.

МЕТАЛЛОНОСНЫЕ ОСАДКИ

Металлоносные осадки представляют собой обогащенные Fe, Mn и некоторыми другими рудными элементами морские отложения. Компоненты металлоносных осадков, как и большинства морских отложений, поступают из различных источников: терригенный (обломочный), биогенный, гидротермальный. Терригенные компоненты заносятся в океан с речным стоком вследствие размыва берегов и ветрового переноса. Наиболее тонкие частицы достигают удаленных от суши глубоководных частей океанов. Во многих случаях терригенные компоненты разубоживают¹ металлоносное вещество осадков. Биологический привнос металлов в осадки имеет ограниченное значение. Его роль возрастает с увеличением глубины, когда разложение биогенного материала приводит к развитию в осадках восстановительных условий, способствующих выпадению из морской воды металлов, которые не осаждаются в окислительной или нейтральной среде (в частности, это относится к урану, молибдену и некоторым другим элементам). Биогенное накопление металлов связывается и с непосредственным извлечением живыми организмами из поверхностных вод океанов ряда элементов, а также аккумуляцией металлов планктонными организмами вследствие процессов метаболизма (обмена веществ в живых организмах) и адсорбции.

¹ Разубоживание – снижение содержания полезного компонента за счет смешения терригенных компонентов с металлоносным веществом осадков.

Одним из важнейших источников металлов в осадках являются упомянутые выше подводные гидротермы, связанные с магматическими массами. Флюиды поздней стадии кристаллизации магм смешиваются при подъеме с океанической водой, образуя гидротермальные растворы переменного состава. Подобные растворы приносят значительную часть Fe, Cu, Zn. Некоторые металлы (Ni, Co, Fe) накапливались в металлоносных осадках в результате выщелачивания из придонных базальтов при воздействии на них гидротермальных растворов.

Среди обнаруженных металлоносных осадков наибольшее экономическое значение в настоящее время имеют осадки Красного моря. Здесь выделяется впадина Атлантис-II, расположенная в рифтовой долине моря, где и сейчас продолжается формирование металлоносных осадков [1]. Во впадине имеется активная гидротермальная система, которая сформировала два слоя рассолов: нижний — с соленостью 25,7% и температурой около 60°C; верхний — соответственно 13,5% и 50°C. Рассолы обогащены Na, Ca, Fe, Mn, Zn, Cu. В процессе циркуляции в осевой части рифтовой зоны рассол вступает в контакт с магматическими породами, где нагревается до 250°C и изменяется при химических реакциях с горячими базальтами, выщелачивая из них значительные количества металлов. По мере разгрузки рассола на дне Красного моря происходит осаждение содержащихся в них металлов сначала в виде сульфидов (пирит, халькопирит, галенит PbS, сфалерит), затем силикатов Fe, окисных соединений Fe и, наконец, оксидов Mn. В отдельных прослоях сульфидов содержится до 20% Zn. Запасы металлов во впадине: Zn — около 2,5 млн т, Cu — 600 тыс. т, Ag — 9 тыс. т.

ПРИБРЕЖНО-МОРСКИЕ РОССЫПИ

Скопления полезных ископаемых в россыпях сформировались в результате механического концентрирования минеральных частиц, высвобожденных при выветривании материнских пород и руд. Минералы россыпей характеризуются высоким удельным весом и устойчивостью к химическому выветриванию. Среди рудных минералов это самородное золото и платина, касситерит SnO_2 , вольфрамит $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$, шеелит CaWO_4 , киноварь HgS , ильменит FeTiO_2 , колумбит $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$, танталит $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$, монацит CePO_4 , циркон ZrSiO_4 .

Большинство минералов россыпей встречаются на расстоянии до нескольких километров от источника, поэтому морские россыпи всегда приурочены к прибрежной зоне. Перенос минералов в основном осуществляется текущей водой. Небольшие концентрации россыпных минералов могут образовываться при подводной эрозии минерализованных пород на дне моря. На перераспределение минералов в россыпях могут влиять течения в акваториях (в частности, круговая циркуляция течений в заливах).

Давно известны прибрежно-морские золотоносные россыпи Аляски. Эти россыпи прослеживаются на 26 км при ширине до 18 км. Золото сосредоточено в тонких слоях (иногда мощностью 2–3 см). Распределение золота гнездовое, расположение обогащенных гнезд связано с особенностями гидродинамики береговых течений. Эти россыпи эксплуатируются, и из них уже добыто более 140 т золота. Прибрежно-морские россыпи золота известны также на северо-востоке России. Морские россыпи касситерита широко распространены в Индонезии, Малайзии и Таиланде, где они прослеживаются на расстояние до 5–15 км от береговой линии (глубина залегания 30–35 м). Эти россыпи в общем балансе добычи касситерита занимают значительное место.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И СПОСОБЫ РАЗРАБОТКИ ПОДВОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

При исследованиях морских месторождений оптимальным является сочетание геофизических и геохимических методов с визуальными наблюдениями и отбором проб полезных ископаемых. Применение комплекса геофизических исследований позволяет получить огромный массив информации о рельефе океанского дна, закономерностях распределения осадков, электрических, магнитных и гравиметрических полях, тепловых процессах, происходящих в океанической коре. Точная регистрация глубины является предпосылкой для любой подводной операции по пробоотбору. Измерение изменений сопротивления морского дна позволяет (особенно на континентальном шельфе) очертить районы с возможной сульфидной минерализацией. Магнитные методы могут фиксировать изменения пород океанского дна, связанные с гидротермальными полями (например, низкие магнитные уровни наблюдаются в районах гидротермальной деятельности во впадине Атлантис в Красном море). Индикатором вулканической и гидротермальной активности могут служить аномальные тепловые потоки.

Геохимические исследования являются существенным дополнением к геофизическим и визуальным методам, вместе с которыми они могут быть использованы для определения рудоносных площадей и оценки качества полезных ископаемых. Наряду с анализом полученного со дна материала они включают также измерения непосредственно на морском дне: исследование рассеяния рудных элементов в морской воде, измерение естественной радиоактивности осадков и рудных скоплений, анализ изотопов ^3He , являющихся чувствительным индикатором гидротермальных эманаций в областях базальтового вулканизма.

Использование подводного фотографирования с помощью приборов, опускаемых с борта судна, позволяет в значительной степени детализировать геолого-геофизические исследования. Настоящую революцию в геологии произвело глубоководное

бурение, которое дало ценную информацию о составе и происхождении осадочного чехла океанической коры и развитой в нем минерализации в ранее недоступных частях океана. Для отбора образцов поверхностных отложений на морском дне (в частности, Fe-Mn-конкреций) широко привлекается драгирование, а для получения разреза металлоносных осадков морского дна используют грунтовые трубки, которые врезаются в морское дно под действием тяжелого груза.

Уникальную возможность непосредственных наблюдений изучаемых рудных объектов и целенаправленного отбора образцов геологи получили при помощи подводных обитаемых аппаратов [5]. Применение таких аппаратов дает возможность проводить детальное геологическое картирование дна океана на основе качественно новой информации (визуальные наблюдения, фиксированный отбор проб, прицельная фототелевизионная съемка, непосредственные гидрофизические и геофизические измерения). Подводные геологические исследования по детальности становятся сопоставимы с геологическими наблюдениями на суше.

Возможность разработки подводных месторождений определяется их природой и экономической значимостью, удобством отработки, наличием способов переработки руд (если они существенно отличаются от подобного полезного ископаемого на суше) и вероятностью воздействия на окружающую среду. Существующие и предполагаемые способы разработки месторождений значительно различаются по сложности. Наименее сложной является разработка россыпных месторождений — многочерпаковое, землесосное и грейферное драгирование, а также драгирование с подвижной платформы. Более сложны системы добычи Fe-Mn-конкреций и металлоносных осадков, располагающихся в глубоководных областях. Здесь возможны две системы: механическая и гидравлическая. Основой механической системы является непрерывная замкнутая тросовая петля, на которой закреплены сгребающие конкреции ковши и которая движется до дна и обратно, подобно конвейерной ленте. Гидравлическая система представлена спускаемой с судна на дно трубой с коллекторным устройством в нижней части, собирающим конкреции посредством гидравлического всасывания. Подъем конкреций на

поверхность осуществляется путем гидравлического всасывания при помощи помп или сжатого воздуха (эрлифт).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировой океан, занимающий более 70% поверхности Земли, является важнейшим потенциальным источником минеральных полезных ископаемых. Руды, возникающие на дне океана, образуются за счет сноса с континентов, заимствования рудных компонентов из морской воды и глубинного поступления их в областях вулканической и гидротермальной деятельности. Высокая скорость рудообразования в океанах делает подобные полезные ископаемые возобновляемыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кронен Д. Подводные минеральные месторождения. М.: Мир, 1982. 390 с.
2. Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Гурвич В.Г. Гидротермальные образования рифтовых зон океанов. М.: Наука, 1990. 256 с.
3. Malahoff A., Embley R.W., Cronan D., Scirrow R. The Geological Setting and Chemistry of Hydrothermal Sulfides and Associated Deposits from the Galapagos Rift at 86°W // Mar. Mining. 1983. Vol. 4, № 1. P. 123–137.
4. Акимцев В.А., Шаранов В.Н. Магматическая рудная минерализация в основных породах Срединно-Атлантического хребта // Геология руд. месторождений. 1996. Т. 38, № 4. С. 122–133.
5. Сагалевич А.М. Океанология и подводные обитаемые аппараты. М.: Наука, 1987. 256 с.

* * *

Виталий Иванович Сотников, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры месторождений полезных ископаемых Новосибирского государственного университета, зав. лабораторией рудно-магматических систем Объединенного института геологии, геофизики и минералогии Сибирского отделения РАН, действительный член Международной академии минеральных ресурсов. Лауреат Государственной премии СССР. Область научных интересов: рудообразование и металлогения. Автор восьми монографий и более 270 научных статей.