

Науки о Земле

УДК 622.7

Лавров Александр Юрьевич
Alexander Lavrov



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВОЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ С ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ КОМПОНЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

THE EFFECTIVENESS RISE OF DEVELOPING ORE DEPOSITS ON THE BASIS OF INNOVATIVE GEOECOLOGICAL TECHNOLOGIES WITH PHOTO-ELECTROCHEMICAL COMPONENTS' ACTIVITY OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Рассмотрены основные теоретические положения комбинированных фотоэлектрохимических процессов в водных растворах, используемых для выщелачивания благородных металлов. Приведен комплекс фотохимических и электрохимических процессов синтеза активных окислителей и комплексообразователей для золота и серебра, металлов платиновой группы. Показано влияние комбинации электрохимических и фотохимических процессов на основные физико-химические параметры выщелачивающих растворов. Рассмотрены конкретные примеры использования растворов, подготовленных в фотоэлектрохимических реакторах

Ключевые слова: дисперсное золото, техногенные образования, фотоэлектрохимическое выщелачивание, фотоэлектрохимический реактор

The article deals with basic theoretical propositions concerning combined photo-electrochemical processes in the aqueous solutions, used to extract precious metals. A complex of photochemical and electrochemical fusion processes of active oxidizers and complexing compounds for gold, silver and platinum group metals are given in this article. The influence of a combination of electrochemical and photochemical processes on the key physical and chemical parameters of the leaching solute is shown. The author gives specific examples of solutions usage prepared in photo-electrochemical reactors

Key words: disperse gold, technogenic formations, photo-electrochemical leaching, photo-electrochemical reactor

Месторождения руд благородных и цветных металлов характеризуются сложными условиями залегания рудных тел, неоднородным вещественным составом, формами нахождения и пространственным распределением полезных компонентов, что предопределяет необходимость использования различных геотехнологий,

основанных как на прямой выемке руд, с последующей их переработкой на обогатительных фабриках и/или ГМЗ, так и на извлечении полезных компонентов на месте залегания или из техногенных образований [1, 3, 4]. При этом, учитывая особую сложность извлечения из низкокачественного минерального сырья, для его

промышленного освоения требуются инновационные ресурсосберегающие и экологически безопасные геотехнологии. Наряду с успешно показавшими себя при подготовке к выщелачиванию и собственно при выщелачивании интенсифицирующими воздействиями мощными наносекундными электромагнитными импульсами (исследования проведены в ИПКОН РАН под руководством академика РАН В.А. Чантурия), электрическими полями определенных параметров и динамики, эффективны также и фотохимические, и фотокаталитические процессы, а также электродиалитические и электродиффузионные (объединяемые термином электросорбционные) [1, 6, 7]. Использование фотохимических процессов для генерации озона и сопутствующих ему высокоактивных окислителей в воздухе или в среде сжатого двухатомарного кислорода с целью последующего озонирования пульпы и выщелачивающих растворов предложено еще в работах чл.-корр. АН СССР И.Н. Плаксина, несколько позже и американских исследователей D.J. Sheiner, R.E Lindstrom, затем W.P. Van Antwerp, Ph.A. Lincoln. Однако, несмотря на высокий уровень извлечения дисперсного золота, достигнутый при использовании озона и сопутствующих ему соединений, вследствие интенсивного окисления минеральных матриц, технические сложности и высокие энергозатраты не позволили этому методу найти широкое применение в горной промышленности.

Использование комбинации процессов электролиза растворов электролитов в сочетании с облучением выделяющихся газов: двухатомарного кислорода и/или хлора, их смеси с водородом и непосредственно контактирующей с их пузырьками пленочной воды ультрафиолетовым светом в диапазоне длин волн 180...250 нанометров, позволяет с высоким квантовым выходом генерировать непосредственно в жидкой среде комплекс высокоактивных окислителей в составе: гидроксил-радикала, перекиси водорода и ее полимерных модификаций, а также высокорекреационных ион-радикальных комплексов [9]. Этот процесс, назван-

ный фотоэлектролизом, был предложен в МГРИ (ныне МГРИ-РГГРУ) с непосредственным участием автора в 1985 г. и был успешно апробирован при выщелачивании металлов активными растворами, приготовленными путем облучения водно-газовой суспензии в приэлектродных зонах, на пробах полиметаллических, медно-цинковых и вольфрам-молибденовых руд ряда месторождений [1,2,3,5,7]. Вместе с тем, несмотря на то, что этот метод получил положительную оценку как в РФ, так и за рубежом, а результаты его некоторых теоретических и экспериментальных аспектов нашли отражение в докторских диссертациях А.Г. Секисова и Л.В. Шумиловой, он до последнего времени не получил завершеного научного обоснования с позиций применимости в геотехнологии. Основной причиной этого, по нашему мнению, является отсутствие системных исследований возможности его использования не только для интенсификации процесса окисления содержащих дисперсные формы золота сульфидных и сульфосольных минералов, а, главным образом, для комплексного интенсифицирующего воздействия на все основные компоненты геотехнологической системы: руды (в общем случае минеральную массу), выщелачивающий раствор (включая растворитель и растворенные вещества), присутствующие в нем газы и сорбенты.

Эффективность использования физико-химических геотехнологий, при освоении участков месторождения со сложными условиями залегания рудных тел и вещественным составом руд, низким содержанием полезных компонентов, во многом определяется степенью их извлечения. Одним из наиболее эффективных путей повышения извлечения металлов при использовании физико-химических геотехнологий является реализация активирующих воздействий на минеральную матрицу как химическими агентами, так и электрическими полями и электромагнитным излучением, в том числе и электромагнитное излучение в жестком ультрафиолетовом диапазоне (180...250 нм). Такое излучение в силу высокой энер-

гии его квантов, обратно пропорциональной длине электромагнитной волны, может при поглощении его электронными оболочками атомов кристаллической решетки или атомов (молекул) раствора и растворенных компонентов, переводить их в возбужденное состояние, в котором они проявляют повышенную реакционную способность. В наибольшей степени фотохимическая активность присуща молекулам таких элементов как кислород и хлор, которые в возбужденном состоянии могут вступать в химические реакции с образованием свободных радикалов, взаимодействие которых с электролитическим водородом при фотокаталитическом действием УФ-лучей производит соответственно перекись водорода, гидроксил-радикал и хлористый водород. Фотохимическое воздействие ультрафиолетового излучения на компоненты геотехнологической среды может обеспечивать синтез активных радикалов только в тонком слое жидкой фазы пульпы или растворов, активировать поверхность минеральных частиц в поверхностном слое пульпы, в то время как использование в комплексе фотохимических и электрохимических процессов обеспечивает интенсивный массообмен за счет «флотационного эффекта» и процесс генерации исходных газовых компонентов. Кроме того, важен синергетический эффект совмещенного воздействия высокоэнергетичных квантов ультрафиолетового излучения и электронообменных процессов в приэлектродных зонах, приводящий к образованию в пленочной воде, на границе раздела жидкой и газовой фаз, активных радикалов и ион-радикалов. Эти компоненты растворов обеспечивают существенное ускорение реакций окисления компонентов минеральной фазы и компонентов, представленных внутриминеральными микровключениями и дисперсными формами.

Эксперименты по комбинированной фотоэлектрохимической и электрохимической обработке модельных растворов выщелачивающих реагентов при соблюдении равенства их исходных параметров были выполнены автором для оценки степени

влияния синергетического эффекта на изменение их основных выходных параметров — ОВП и рН. Как видно из приведенных графиков, комбинация электрохимических и фотохимических процессов в сравнении с простой электрохимической обработкой позволяет существенно изменить основные физико-химические параметры выщелачивающих растворов (рис. 1).

Таким образом, в наибольшей мере интенсифицирующее воздействие УФ-лучей может быть проявлено в сочетании с электрохимической обработкой пульпы и/или растворов.

Фотохимические, фотоэлектрохимические и фотокаталитические процессы, протекающие в растворах и фазах рудных пульп, в систематизированном виде представлены на рис. 2 и в таблице.

Для исследования этих процессов нами проведены эксперименты по синтезу высокоактивных реагентных комплексов и выщелачиванию ими цветных и благородных металлов, фотокаталитической обработке пульпы различного вещественного состава и плотности. Для этого в лабораториях РГ-ГРУ-МГРИ, ООО «Геохим», ЧФ ИГД СО РАН непосредственно с участием автора были разработаны и смонтированы лабораторные стенды, в состав которых входил электрохимический блок и источник ультрафиолетового излучения.

На первой, предварительной стадии электрохимической или фотоэлектрохимической обработки пульпы или растворов реагентов осуществляется электросинтез или фотоэлектросинтез вторичных реагентов, в первую очередь, таких как H_2O_2 , OH^* , HCl и других активных соединений кислорода, водорода и хлора. Последующим активирующим воздействием на пульпу и образованный в ней на предыдущей стадии комплекс реагентов переменным электрическим полем, вторичным ультрафиолетовым излучением или слабыми многоканальными электроразрядами, обеспечивают реализацию системы физико-химических процессов в жидкой и твердой фазах, приводящих в конечном итоге к переводу металлов в растворенное состояние [5, 7, 8, 10].

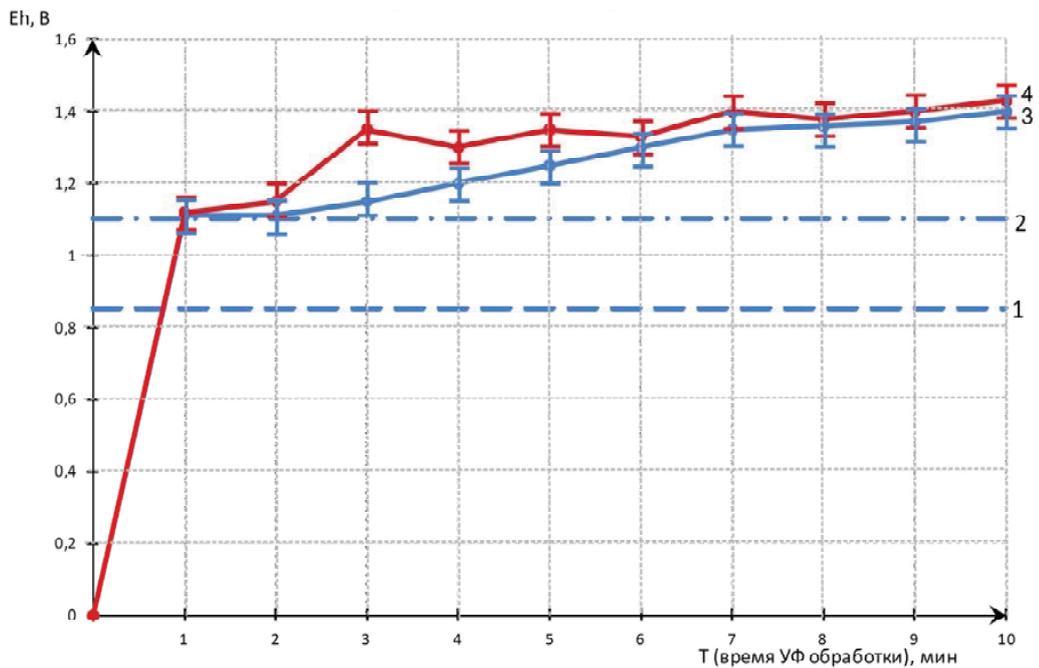


Рис. 1. Изменение ОВП при стандартных и фотоэлектрохимических схемах

1. Гипохлоритная схема (рН 7,8), электролиз раствора NaCl (30г/л) в течение 1 ч, $C_{\text{Cl}_2} = 1,35$ г/л, $E_{\text{Au}} = 35 \dots 45$ %
2. Гипохлоритно-солянокислотная схема (подкисление HCl до рН=3), $C_{\text{Cl}_2} = 1,08$ г/л, $E_{\text{Au}} = 65 \dots 78$ %
3. Гипохлоритно-солянокислотная схема с УФ облучением $E_{\text{Au}} = 75 \dots 83$ %
4. Гипохлоритно-солянокислотная схема с предварительным наикислороживанием и УФ облучением $E_{\text{Au}} = 82 \dots 90$ %

Модель фотоэлектрохимических процессов в растворах и пульпах

Жидкая фаза	Твердая фаза	Газовая фаза	Процессы на границах раздела фаз
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{OH}^\cdot$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{OH}^\cdot$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^\cdot$ $\text{H}_2\text{O}^\cdot + \text{O}^\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{OH}^\cdot$ $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (в присутствии $\text{Cl}^\cdot, \text{SO}_4^{2-}$) $\text{HClO} \rightarrow \text{HCl} + \text{O}^\cdot$ $\text{HClO} \rightarrow \text{Cl}^\cdot + \text{OH}^\cdot$ $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^\cdot$ $[\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+} \rightarrow$ $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} + \text{OH}^\cdot$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{OH}^\cdot$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^\cdot$ $\text{OH}^\cdot \rightarrow \text{OH}^\cdot$ $\text{H}^\cdot \rightarrow \text{H}^0$ $\text{H}^\cdot + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+$ $\text{H}^\cdot + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_5\text{O}_2^+$ $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^\cdot$ $\text{OH}^\cdot \rightarrow \text{OH}^0 \rightarrow \text{OH}^\cdot$	$\text{Men Sm} \rightarrow \text{Men}$ $\text{Sm}(e^-, e^+)$ $\text{Men Sm} \rightarrow$ $n\text{Me}^{2+} + m\text{S}^0$ $\text{Men Sm} \rightarrow$ $n\text{Me}^0 + m\text{S}^{2-}$ $(\text{Au}_x(\text{HS})_2\text{S})^{2-} +$ $+ (\text{O}_2\text{C}-\text{CO}_2)^+ \times$ $\text{O}(\text{H}^\cdot\text{H}) + \text{NaCN}$ $(\text{H}^\cdot\text{Au}(\text{CN})_2^-)$	$\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}^\cdot$ $\text{O}_2 + \text{O} \rightarrow \text{O}_3$ $\text{O}_3 \rightarrow \text{O}^\cdot + \text{O}_2$ $\text{H}_2 + \text{O}^\cdot \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{OH}^\cdot$ $\text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{Cl}^\cdot$ $\text{H}_2 + \text{Cl}^\cdot \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{HCl}$ $\text{H}^\cdot + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{Cl} + \text{Cl}^\cdot$ $\text{H}_2\text{O}^\cdot + \text{HCl} + \text{O}^\cdot \rightarrow$ $\text{HClO}^\cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CO}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow$ $(\text{CO}_2\text{CO}_2)^+ + e^-$ $\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}^\cdot$	$2\text{OH}^0 \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 2\text{H}^+$ $2\text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{OH}^0 \rightarrow \text{OH}^\cdot$ $n\text{OHMe}^{2+} m\text{OH}^\cdot\text{H}^\cdot$ $(\text{O}_2\text{C}-\text{CO}_2)^+ \times$ $\text{O}(\text{H}^\cdot\text{H})$

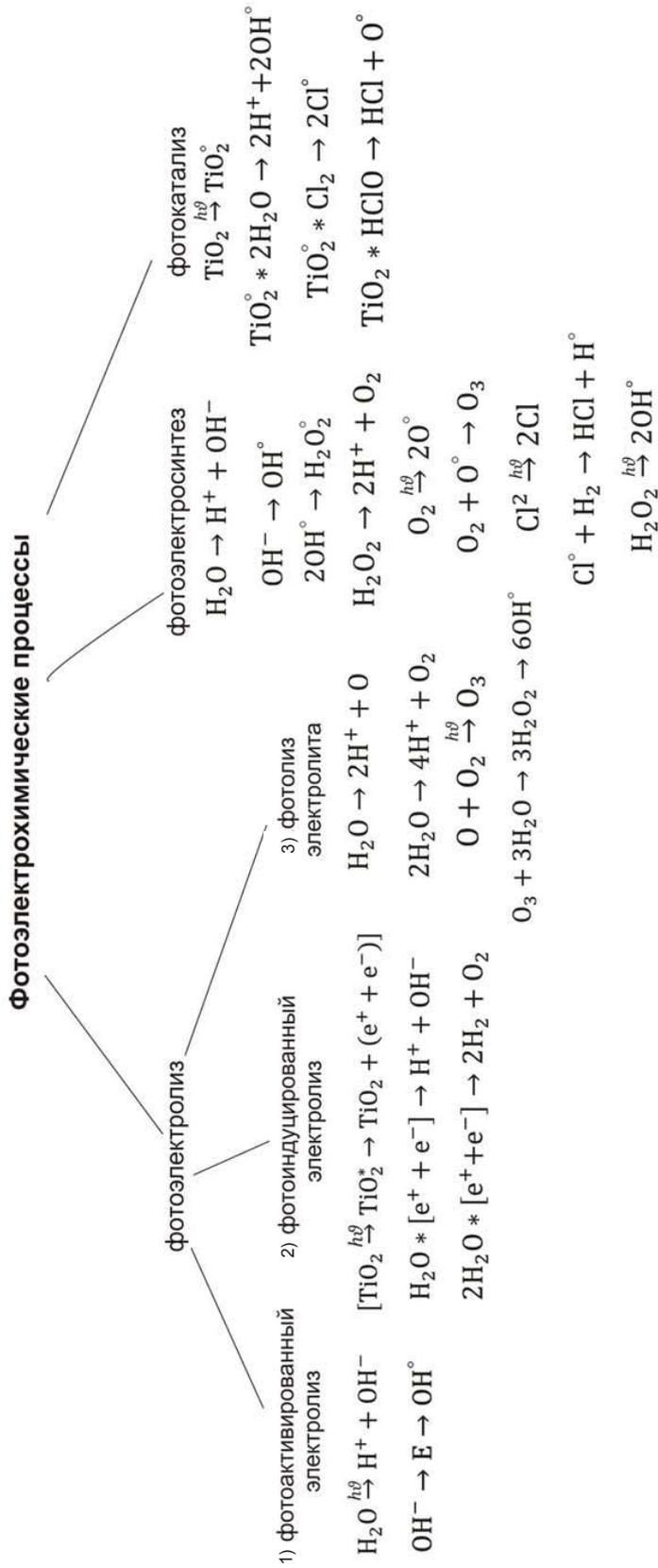


Рис. 2. Систематизация фотоэлектрохимических процессов в рудных пульпах

В основной части экспериментов в качестве комплексобразователей использовался цианид натрия, вводимый в активный раствор или агломерируемую массу. Для сравнения готовились стандартные цианидные растворы, такой же концентрации, но на базе воды, насыщенной химически чистым кислородом. Максимальный вес технологической групповой

пробы Дарасунских хвостов обогащения на завершающем этапе испытаний составил 38 кг. Пробы после агломерации помещались в пластиковые колонны, оборудованные дренажной системой. По экспериментальной (фотоэлектрохимической) схеме было получено извлечение 83 %, по контрольным (стандартный цианидный раствор равной концентрации) – 28...43 %.

Литература

1. Лавров А.Ю. Геоэкологические и геотехнологические процессы эффективного освоения месторождений руд золота и цветных металлов. Чита: ЧитГУ, 2008. 203 с.
2. Лавров А.Ю., Секисов А.Г. Фотохимическая и электрохимическая активация процессов выщелачивания и сорбции дисперсных форм благородных металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 6. С. 179-183.
3. Секисов А.Г., Зыков Н.В., Королев В.С. Дисперсное золото: геологический и технологический аспекты. М.: Горная книга, 2012. 224 с.
4. Секисов А.Г., Зыков Н.В., Лавров А.Ю., Манзырев Д.В. Аналитические и технологические проблемы переработки руд с дисперсным золотом / Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы IV Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых (Хабаровск, 27-29 сентября 2011 г.). В 2 т. Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2011. Т. 1. С. 396-398.
5. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Четкин В.С., Манзырев Д.В. Результаты укрупненных лабораторных экспериментов по выщелачиванию меди и благородных металлов из борнит-халькозиновых руд Удоканского месторождения / Труды всероссийской конф. с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (9-12 октября 2012 г.). В 2 т. Т. 1. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. С. 312-315.
6. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Шевченко Ю.С., Манзырев Д.В., Петухов А.А., Конарева Т.Г. Геотехнологии извлечения дисперсного и «тонкого» золота из техногенных минеральных образований Забайкальского края // Вестник Читинского государственного университета № 1 (80). Чита: ЗабГУ, 2012. С. 34-42.
7. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Шевченко Ю.С., Попова Г.Ю. Перспективы использования физико-химических геотехнологий при освоении золото-молибденных месторождений и техногенных образований: сб. матер. конф. // Кулагинские чтения: XII Международная научно-практическая конференция. Чита: ЗабГУ, 2012. Ч. VI. С. 131-134.
8. Секисов А.Г., Рубцов Ю.И., Лавров А.Ю., Конарева Т.Г., Петухов А.А. Стадийное кучно-кюветное выщелачивание золота и сопутствующих компонентов из техногенных минеральных образований / Вестник Забайкальского горного колледжа им. М.И. Агошкова: Агошковские чтения. Чита: ЗабГК, 2012. № 5. С. 102-106.
9. Секисов А.Г., Трубачев А.И., Салихов В.С., Лавров В.Ю., Манзырев Д.В., Шевченко Ю.С. Геолого-технологическая оценка и новые геотехнологии освоения природного и техногенного золотосодержащего сырья Восточного Забайкалья. Чита: ЗабГУ, 2011. 312 с.
10. Пат. 2461637 Российская Федерация, МПК С22В 11/00, С22В 7/00, С22В 3/04. Способ переработки техногенного минерального сырья с извлечением промышленно ценных и/или токсичных компонентов / А.Г. Секисов, Ю.Н. Резник, Ю.И. Рубцов, Т.Н. Александрова, А.Ю. Лавров; патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЗабГУ» – 2011109335/02; заявл. 11.03.2011; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26. 5 с.

Коротко об авторе _____ **Briefly about the author**

Лавров А.Ю., канд. техн. наук, профессор, декан факультета экономики и управления, Забайкальский государственный университет
Тел.: (3022) 41-68-44

A. Lavrov, Candidate of Technical Sciences, professor, dean of the faculty of Economics and management, Zabaikalsky State University

Научные интересы: обогащение полезных ископаемых

Scientific interests: enrichment of minerals

