

УДК 550.47

Овсянникова Т.М. (ФГБУ «ВИМС»)

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ СКРЫТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*Биогеохимические методы являются доступным и одним из наиболее эффективных инструментов, используемых при поисках скрытых руд. Анализ новых данных по биогеохимии рудных месторождений позволяет оптимизировать методики опробования, в том числе на основе выделения комплекса приоритетных биоиндикаторов оруденения различных типов. На участке погребенного уранового месторождения Столбовое изучены возможности применения радиоизотопных показателей (активностей ^{210}Po , ^{210}Pb , общей активности в озоленных пробах растительности), по совмещенным аномалиям которых локализована зона оруденения. **Ключевые слова:** поисковая биогеохимия, растительность, урановые месторождения, ^{210}Po , ^{210}Pb , общая активность.*

Ovsyannikova T.M. (VIMS)

BIOGEOCHEMICAL METHODS FOR DETECTING BLIND DEPOSITS

*The biogeochemical methods are available and one of the most effective tools used to discover blind ores. Analysis of recent data on the biogeochemistry of mineral deposits allows to improve the survey techniques, in particular, by designing a suite of key bio-indicators for various types of mineralization. The radioisotopic indicators (^{210}Po and ^{210}Pb activities, total activity in the ashed plant samples) were studied at the site of the concealed uranium deposit Stolbovoo, where their combined anomalies helped localize the mineralization zone. **Keywords:** exploration biogeochemistry, plants, uranium deposits, ^{210}Po , ^{210}Pb , total activity.*

Биогеохимические методы, основанные на выявлении ореолов рассеяния рудных элементов и их спутников, а также других специфических признаков оруденения в биообъектах — это доступный и один из наиболее эффективных инструментов поисковой геологии. Развитие этих методов — от геоботаники и флорометрии до мультиэлементных, изотопно-биогеохимических и микробиологических технологий происходило по мере изменения поисковых задач, накопления фактического материала и результатов научно-методических работ, совершенствования аналитической базы. К настоящему моменту собран огромный массив данных по биогеохимии рудных месторождений, практическое освоение которого требовало систематизации и обобщения. Наиболее полно эта тематика освещалась в монографиях С.Е. Dunn, 2007, А.Л. Ковалевского и

О.М. Ковалевской, 2010. Кроме этих работ, в представленной обзорной статье проанализированы последние публикации¹ и оригинальные материалы, кратко изложены принципы применения биогеохимических методов при поисках скрытых руд, выделен комплекс приоритетных биоиндикаторов оруденения различных типов и даны некоторые практические рекомендации, позволяющие оптимизировать поисковые технологии.

Главное направление биогеохимических исследований основано на опробовании растительности, преимущества которого при поисках скрытой минерализации обусловлены объективными причинами: 1) глубинность исследований повышена по сравнению с почвенным опробованием; 2) обеспечивается возможность круглогодичного опробования, высокая производительность работ и минимальное воздействие на окружающую среду; 3) контрастность геохимического сигнала более высокая за счет «избирательности» растений по отношению к наиболее подвижным формам химических элементов, т.е. экзогенной компоненте²; 4) за счет многократного увеличения «объема» опробуемой среды, по сути представляющей собой всю корнеобитаемую зону, снижается риск пропуска слабых локальных аномалий. Однозначна целесообразность биогеохимического опробования по поверхности перемещенных пород, на заболоченных участках при наличии многолетней мерзлоты и в других сложных для стандартных поисковых технологий условиях («Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений», 1983).

Формирование геохимических ореолов в растениях определяется следующими основными факторами: 1) содержанием и доступностью для поглощения растениями элементов в питающей растения среде; 2) величиной поверхности контакта корневых систем растений с лито-, гидро- и атмосхимическими ореолами рассеяния; 3) функцией накопления элементов в органах (частях) и тканях растений в зависимости от их содержаний в корнеобитаемой зоне (представительном почвенном горизонте) — так называемой «барьерностью».

Согласно выводам А.Л. и О.М. Ковалевских, 2010, в большинстве случаев в области низких содержаний элементов (на геохимическом фоне) накопление элементов происходит по линейному закону, затем, по мере увеличения содержаний элементов, достигается предел биологического поглощения (биологический

¹ По причине редакционных ограничений в тексте статьи упомянуты только авторы и год публикаций.

² Поглощение растениями химических элементов может рассматриваться как «аналог» методов частичной экстракции. Свойство клеточного сока корневых волосков растворять некоторые минеральные формы с образованием устойчивых комплексов с различными металлами (например, Au) рассмотрено Ma Y., Rate A.W., 2009.

«барьер»), за которым функция накопления приобретает иной вид, часто обратной зависимости. Условный показатель барьерности увеличивается в ряду элементов: Ra, Sr, Mo, Au, Bi, Cd, W, Rb, As, Zn, Pb, Be, Ba, Ag, Cs, B, Co, Cu, Li, U, Fe, F, Mn (для Ra барьеры практически не обнаружены).

Для описания и сравнения способности концентрирования разных химических элементов различными видами растений и их частями в тех или иных условиях (геологических, ландшафтно-геохимических, климатических и др.) был введен коэффициент биологического поглощения (КБП), представляющий собой отношение содержания элемента в золе растений к его содержанию в питающей растения среде. Информация о величинах КБП доступна в электронных и других источниках, но требует внимательного отношения и корректного применения³. В общем, чем больше КБП растений (или их частей), произрастающих в одинаковых условиях, тем большее поисковое значение (информативность) они имеют⁴. Смешивание видов и частей растений с разными КБП, а также попадание в пробы лишайников или мхов нежелательно, т.к. приводит к возникновению ложных аномалий.

Целесообразность опробования растительности может быть оценена на основе известных геохимических характеристик искоемых рудных объектов и их ореолов, комплекса потенциальных элементов-индикаторов оруденения с наибольшей миграционной способностью, физико-химических и других свойств и закономерностей поведения элементов-индикаторов в верхних слоях геологического разреза, наличия на поисковых площадях распространенных информативных растительных объектов и их «барьерности» по отношению к элементам-индикаторам. При одинаковой информативности преимущество имеют виды растительности с более глубокой корневой системой.

Ограничением биогеохимического опробования в конкретных ландшафтно-геохимических условиях является слабая доступность химических элементов для поглощения растениями, а также их полный или практически полный вынос из корнеобитаемой зоны.

Практическое значение имеет преимущественный характер распределения элементов в растениях — с уменьшением содержаний от листьев к стеблям и корням (например, для Se и Po) или наоборот (Ra, U, Pb, Cu, Ag, Au, Be, Sn, Co и др.), а также фаза развития отдельных опробуемых экземпляров растительности при анализе на некоторые элементы (Cu, Mo, V, Sn, Zn, Pb, Co, U и др.). Менее подвержены временным

³ Распространены очень близкие «модификации» наименований этого параметра: «коэффициент биологического поглощения» (ВАС/КБП), «почвенный коэффициент перехода» (STF), определяемый как отношение содержания элемента в растении (на сырую или сухую массу) к его содержанию в почве. «Растительно-почвенный коэффициент» (РПК) [3] практически аналогичен КБП. Очень часто эти параметры определяли в искусственно созданных условиях.

⁴ Например, относительно недавно перспективным биообъектом при опробовании на редкоземельное оруденение признаны папоротники, концентрирующие REE (Blumel B. et al., 2013, Christie A.V. et al., 2013).

вариациям концентраций относительно «старые» части растений — кора, стволовая древесина, корни и др.

Еще одним мешающим фактором является присутствие в растениях химических элементов из посторонних источников, не связанных с искомой минерализацией и вмещающими породами, прежде всего из атмосферных аэрозолей. Эти элементы обычно отличаются очень высокой биологической доступностью; максимальное загрязнение ими, очевидно, имеют внешние надземные части растений, поэтому их рекомендуется ополоснуть водой сразу после отбора. В связи с этим опробование водных мхов, несмотря на отмечаемую в некоторых работах высокую контрастность биогеохимических аномалий тяжелых металлов по сравнению с литохимическими [9], может быть рекомендовано только на региональной стадии работ. По-видимому, этим объясняются результаты, полученные А.И. и О.И. Гусевыми, 2012.

В общем случае к элементам-индикаторам следует отнести все элементы, по которым наблюдается четкий геохимический контраст оруденения (зон вторичных изменений и т.п.) и вмещающих пород, в том числе по минеральным формам. Из них поисковое значение имеют элементы, для которых этот контраст сохраняется в последующих процессах миграции и биологического поглощения. В соответствии с этим принципом химические элементы могут быть разделены на несколько групп по их биоиндикаторной способности:

1) относительно неблагоприятные для поисков — необходимые растениям макроэлементы, весьма распространенные элементы, а также менее распространенные элементы, в естественных условиях поглощаемые растениями по барьерному типу (N, K, P, Ca, Mg, S, Al, Fe, Na, Mg, Ti, Th, U и др.);

2) относительно благоприятные для поисков — необходимые растениям микроэлементы и другие менее распространенные и сравнительно подвижные вблизи земной поверхности элементы, в естественных условиях поглощаемые растениями по безбарьерному типу (B, Co, Cu, Mn, Mo, Zn, Ni, Cd, As, V, I, Br, Hg и др.);

3) наиболее благоприятные для поисков — менее распространенные, сравнительно малоподвижные вблизи земной поверхности элементы, а также следовые, достаточно подвижные вблизи земной поверхности элементы, в естественных условиях поглощаемые растениями по безбарьерному типу (Pb, W, Ta, Nb, Au, Ag, Bi, REE, PGE, Se, Tl, Ra и др.).

Материнские и дочерние радионуклиды в силу различий ядерно-физических, физических и химических свойств, а также стабильные изотопы способны фракционироваться в геохимических и биогеохимических процессах, формируя ореолы специфического состава, который отражает свойства геологических объектов и, в некоторых случаях, указывает на скрытое оруденение. При поисках скрытых руд практический интерес представляют радиоактивные и радиогенные изотопы рядов распада U и Th, а также изотопы S и N, несмотря на явно недостаточную изученность их поведения

в системе породы-почвы-растения. Изотопные данные дополняют и во многом объясняют общую биогеохимическую «картину», повышая достоверность интерпретации аномалий, а также имеют самостоя-

тельное значение при поисках радиоактивных руд (например, в условиях активного выноса U и Ra из корнеобитаемой зоны более информативными биоиндикаторами могут быть изотопы Pb и Po).

Эти выводы подтверждаются результатами радиобиогеохимических исследований на участке уранового месторождения Столбовое, выполненных ФГБУ «ВИМС» в 2017–2018 гг. Всего исследовано пять биообъектов (внешняя кора и ветви березы, ветви сосны и ели, мхи), среди которых выделены наиболее информативные. Над погребенными рудами, не обнаруживаемыми литохимической съемкой (в том числе из-за присутствия курумов и невыдержанности почвенного слоя), зафиксированы совпадающие аномалии альфа- и бета-активностей (Σ_α , Σ_β) в озоленных пробах веток ели и березы при большей контрастности распределения Σ_α и $^{210}\text{Po}^*/^{210}\text{Pb}$ (рис. 1, 2). Для всех исследованных объектов достаточно четко проявлен рост общей альфа-активности в препаратах проб в трехнедельном временном интервале, что указывает на присутствие в них ^{226}Ra и накопление его дочерних продуктов распада (ДПР). Однако активность ^{226}Ra не превышает активность ^{210}Po , очевидно, формирующую основной вклад в величину параметра Σ_α . Этот факт опровергает сложившиеся представления [3] об исключительно радиевой природе биогеохимических аномалий активности над урановыми месторождениями (аналогичные выводы вытекают из анализа распределения отношений природных радионуклидов и ^{137}Cs в пробах мха, рис. 3). Вместе с тем существенно неравновесные значения изотопных отношений ^{210}Po и ^{210}Pb в пробах ветвей сосны и ели —

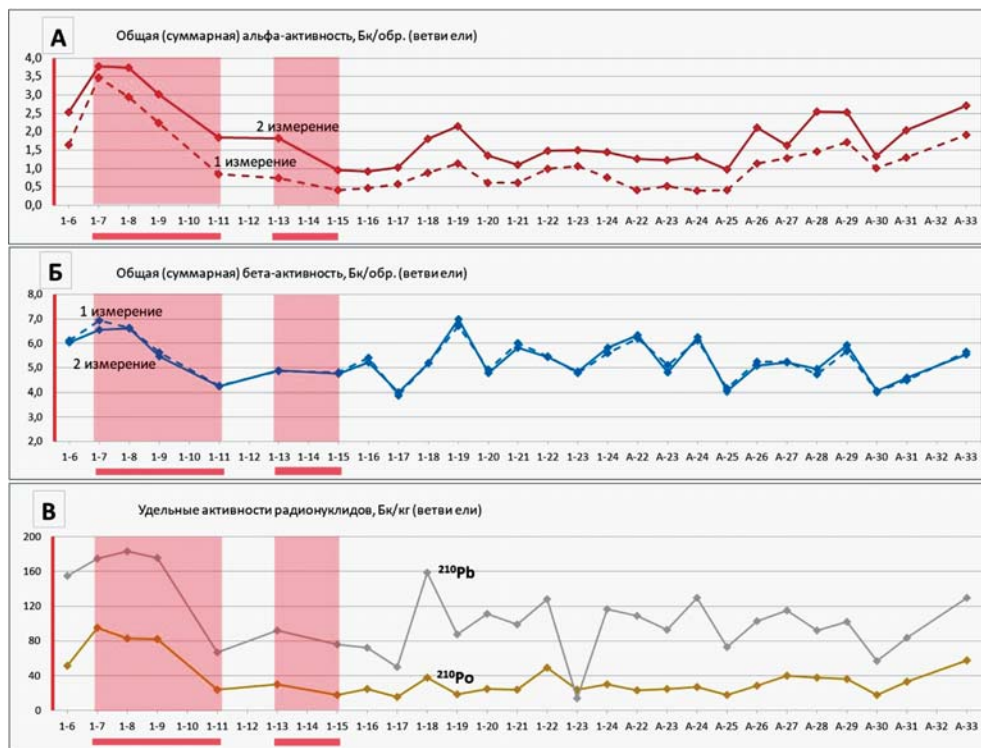


Рис. 1. Общие альфа- и бета-активности (Бк/обр.) и удельные активности ^{210}Pb и ^{210}Po (Бк/кг) в озоленных пробах ветвей ели (соответственно А, Б, В), отобранных на поисковом профиле (проекции зон оруденения показаны розовой заливкой)

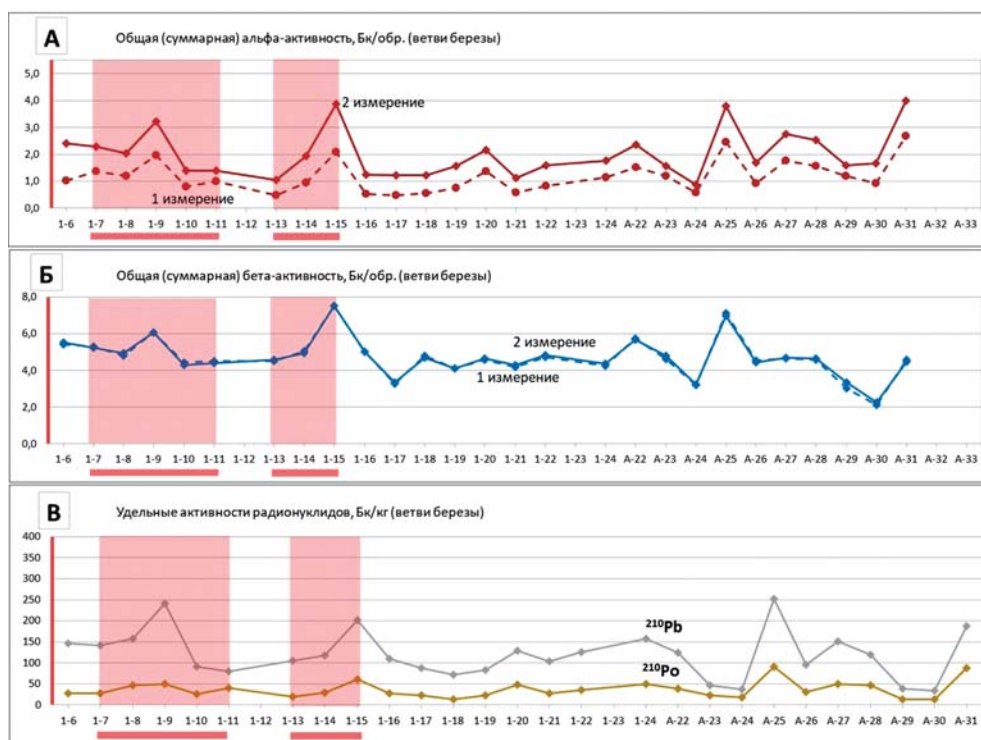


Рис. 2. Общие (суммарные) альфа- и бета-активности (Бк/обр.) и удельные активности ^{210}Pb и ^{210}Po (Бк/кг) в озоленных пробах ветвей березы (соответственно А, Б, В), отобранных на поисковом профиле (проекции зон оруденения показаны розовой заливкой)

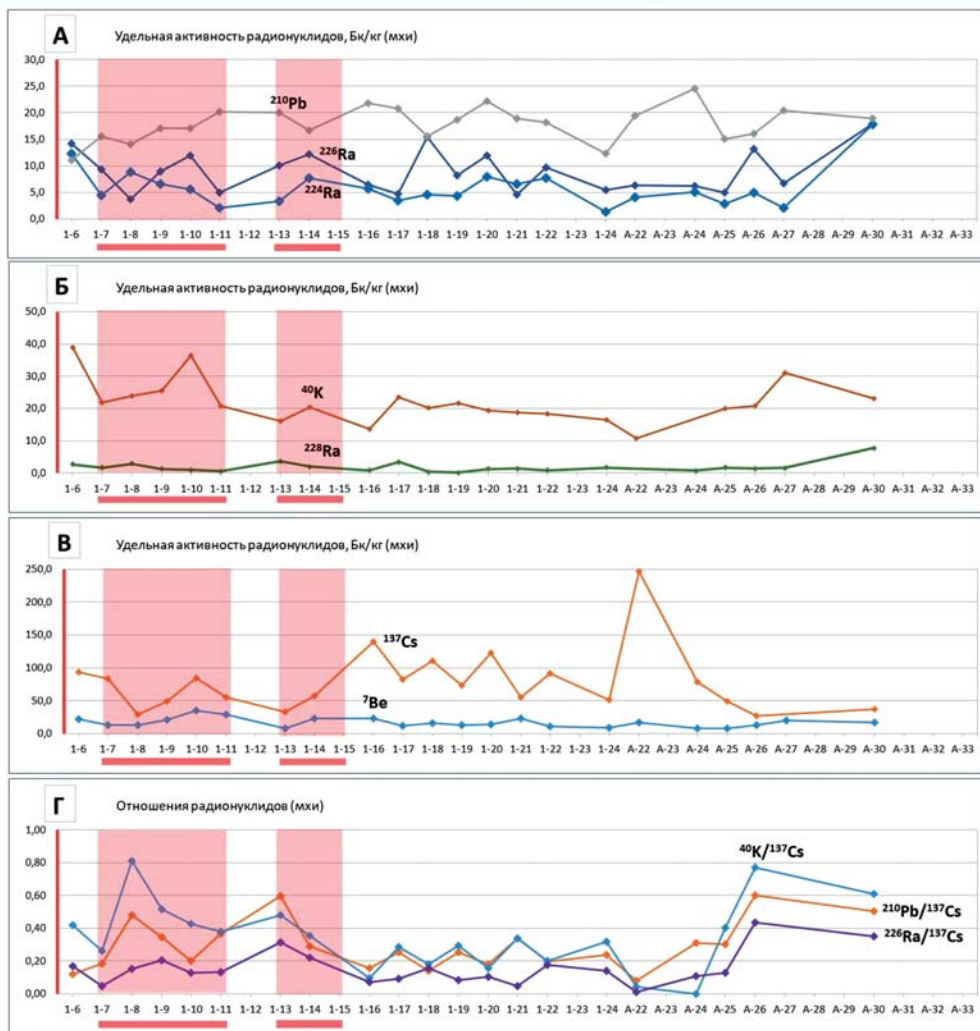


Рис. 3. Удельные активности (Бк/кг) и изотопные отношения радия, ^{210}Pb , ^{40}K (А, Б), ^{137}Cs и ^7Be (В, Г) в пробах мха, отобранных на поисковом профиле, по данным гамма-спектрометрического анализа (проекции зон оруденения показаны розовой заливкой)

$^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb} \sim 0,2-0,5$, свойственные дождевым водам, — указывают на преимущественно атмосферное поступление этих изотопов в растения.

Ниже представлены биогеохимические характеристики элементов, наиболее перспективных в качестве биоиндикаторов скрытого оруденения.

Радий (^{226}Ra) в растениях традиционно считается основным индикатором урановых руд, в том числе из-за относительной простоты анализа по общей альфа-активности озоленных проб. Интерпретация «радиевых» аномалий осложняется из-за возможной активной миграции Ra в поверхностных условиях, а также, как показано выше, несовершенства «классической» измерительной процедуры с неустранимым влиянием природных альфа-излучающих радионуклидов (главным образом ^{210}Po). Более корректное определение активности ^{226}Ra выполняется по его собственной гамма-линии или излучению дочерних продуктов распада ^{214}Pb и ^{214}Bi (после герметизации проб) с использованием высокоразрешающих спектрометров с ОЧГ-детекторами. Предварительная подготовка растительного материала в этом случае минимальна. Немаловажно, что одновременно с ^{226}Ra в пробах могут быть

измерены содержания калия (по ^{40}K), урана (по ^{234}Th), изотопов радия из ряда Th, ^{210}Pb .

Одним из наиболее эффективных биоиндикаторов является свинец, обычно слабо подвижный в зоне гипергенеза, хорошо захватываемый почвами и поглощаемый безбарьерными видами и частями растений до значительных концентраций. Отношения радиогенных изотопов Pb часто бывают специфичными для отдельных геологических объектов (месторождений, рудовмещающих массивов и т.п.), наследуются перекрывающимися отложениями, почвами и растительностью и служат поисковым признаком различных руд (U, Au, Pb, Cu и др.) [7, 15, 19 и др.]. Избыток ^{206}Pb ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} < 0,8$) в растительности представляет интерес в связи с поисками урановых месторождений типа «несогласия»; «глубинность» этого биоиндикатора достигает 400 м [13]. Для анализа изотопных отношений выбирают наименее «загрязненные» обыкновенным Pb части расте-

ний, например, стволую древесину деревьев, что требует снижения аналитических пределов из-за существенного уменьшения общего содержания Pb. В благоприятных условиях значения $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb} > 1$ в почвах и растительности могут указывать на скрытое урановое оруденение (Т.М. Иванова и др., 2006), однако информативность отношения $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ как биоиндикатора может быть сведена к нулю вариациями активностей «атмосферных» ^{210}Po и ^{210}Pb , влияние которых минимизируется тем же способом.

Тантал и ниобий имеют очень низкий биогеохимический фон, что способствует формированию контрастных аномалий этих элементов над скрытым оруденением; примеры таких аномалий рассмотрел С.Е. Dunn, 2007: над собственными рудами (Ta — Ta-Li-Cs, Nb — Ta-Nb), а также обогащенными Ta/Nb кимберлитами (по периферии или в обрамлении диатрем). То же, вероятно, справедливо для сурьмы и висмута, связанных со многими рудными элементами и обладающих малой подвижностью в большинстве поверхностных геохимических обстановок. В пределах уранового месторождения Сигар Лэйк аномалии Bi (совместно с U) в растениях были значительно бо-

лее интенсивными по сравнению с другими элементами (REE, Th, Co, Sn и др.) [13]. Рудные тела Синюхинского Au-Cu-скарнового месторождения проявлены в биогеохимических аномалиях Bi, Cu, Ag и Sb, причем Bi концентрировался растениями наиболее активно (А.И. Гусев, О.И. Гусева, 2012). Широко практикуется биогеохимическое опробование на *золото*, т.к. его ореолы в растениях часто более контрастны по сравнению с литохимическими при более простых процедурах отбора, подготовки и анализа проб [5, 9, 18 и др.]. Результаты определения Au в растительности, не всегда достаточно воспроизводимые, рекомендуется комплексовать с данными по элементам-спутникам (As, Sb, Hg, Bi и др.) [9].

Аномалии *серебра и кобальта* в растительности обычно отличаются высокой контрастностью по сравнению с ореолами более подвижных рудных элементов и их спутников (U, Zn, Cu, Ni, Mo, As и др.) и находятся ближе к источнику [3, 9]. Кобальт главным образом проявляет себя как спутник никеля, если в разрезе преобладают мафические и ультрамафические породы, и иногда следует по периферии биогеохимических ореолов Au [9, 14].

Мышьяк рассматривается как один из важных биоиндикаторов руд Au, основных металлов и металлов платиновой группы [9]. При интерпретации биогеохимических аномалий следует учитывать типичную обратную корреляцию подвижности As с содержаниями Fe и Al в почвах (В.В. Иванов, 1996).

Молибден — литохимический индикатор Мо-содержащих руд (Cu–Mo, Cu–Au–Mo, W–Mo и др.) — обычно подвижен в поверхностных условиях и активно накапливается растениями (до 1–2 % в золе травянистых видов) [3, 9]. В тех случаях, когда миграция Мо затруднена, например, в гумидных зонах на кислых, слабокислых и нейтральных почвах, над оруденением могут фиксироваться интенсивные биогеохимические аномалии (до 5–20 локальных фоновых значений), локализирующие минерализацию [2, 12].

Четкие аномалии Pb, Mo и W отмечены М. Согнелиус и др. (2005) в растительности над погребенными госсанами на участке месторождения Zn-Pb-(Cu-Au-Ag) при характерном отсутствии ореолов Zn, что объясняется активным рассеянием *цинка* и способностью растений накапливать его до значительных концентраций. Напротив, Н.Р. Неммат, А.Р. Чива (2005) отметили большую, по сравнению с другими элементами, контрастность биогеохимических ореолов Zn над Pb-Zn рудами. Согласно [9], зоны

обогащения рыхлых пород Zn проявляются контрастнее в биогеохимических ореолах ассоциированного с ним *кадмия*, что обуславливается меньшим фоном Cd; в случае ассоциации Cd-Au повышенные содержания Cd в растениях распространяются значительно шире ореолов Au.

Не выясненными остаются индикаторные возможности *никеля и меди*. По-видимому, по аналогии с Zn они ограничены для Ni (в некоторых растениях концентрации Ni достигают n-1 %) [3, 9], хотя некоторый интерес может представлять биогеохимическая ассоциация Ni-Co [2]. Для меди, обычно подвижной в зоне гипергенеза, опубликованы противоречивые экспериментальные данные и выводы [3, 6, 9 и др.]. С.Е. Дунн (2007), обращая внимание на сложность интерпретации биогеохимических аномалий Cu, советует заверять все результаты свыше 15 ppm (на сухую массу) как указывающие на возможное оруденение.

Измерение содержаний (активности) *урана* в растениях (фитоуранометрия) — стандартный прямой метод поисков урановых руд, ограничения которого связаны с высокой миграционной способностью и низкими пределами биологического поглощения элемента [3, 4, 9 и др.]. У практически недоступен для биологического поглощения на гидроморфных почвах и почвах с большим количеством органики; исключение, по-видимому, здесь составляют мхи, сорбирующие U непосредственно из жидкой фазы (А.П. Лопаткина и др., 1988). Малая эффективность U в качестве биоиндикатора скрытого оруденения учитывается введением в стандартный поисковый комплекс его типичных спутников — Mo, V, As, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Ag, Cd, Bi, Se и др. Над урановой минерализацией типа «несогласия» характерно доминирующее обогащение растительности U, Bi, REE, Th, Ba, Co, Sn, Li, Ga, Be, Mo, V, Fe, Al [13]. Сходная ассоциация элементов установлена на участке месторождения Столбовое; над рудной зоной фиксируются слабые биогеохимические аномалии, более контрастные в виде мультипликативного показателя (рис. 4).

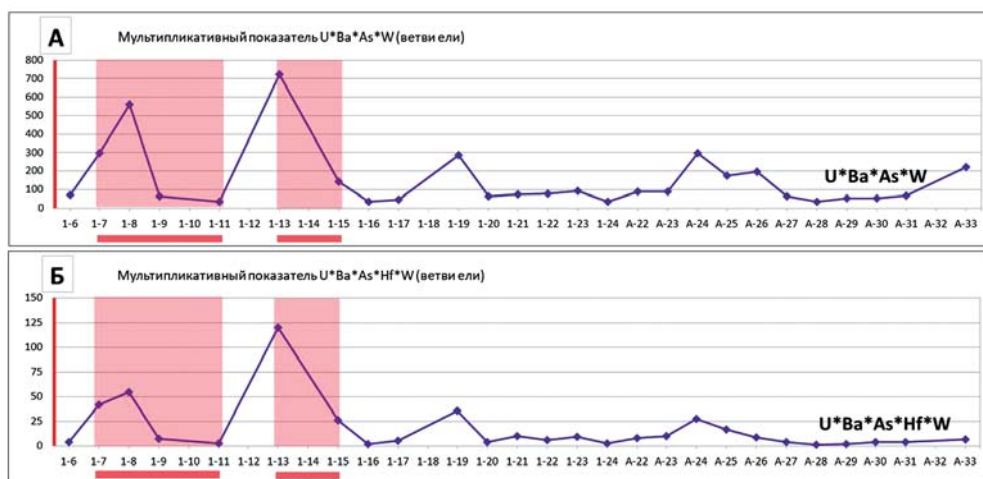


Рис. 4. Распределение мультипликативного показателя $U \cdot Ba \cdot As \cdot W$ (А) и $U \cdot Ba \cdot As \cdot Hf \cdot W$ (Б) в озонированных пробах ветвей ели, отобранных на поисковом профиле (проекции зон оруденения показаны розовой заливкой)

Изотопный анализ U в растениях может повысить эффективность фитоуранометрии, т.к. доступность ^{234}U для растений выше, чем ^{238}U (в поровых растворах и вторичных минералах, как правило, преобладает ^{234}U). Биогеохимические аномалии $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ должны иметь большую контрастность по сравнению с литохимическими; этот вывод в целом подтверждается на рудопроявлении инфильтрационного типа (Т.М. Иванова и др., 2006). С.Е. Dunn (2007) отмечает перспективы биогеохимии U для поисков руд других металлов (в том числе Au), месторождения которых могли формироваться в условиях проникновения слаборадиоактивных урансодержащих растворов.

Ванадий достаточно часто ассоциируется с ураном и рекомендуется в качестве его биогеохимического индикатора, несмотря на невысокую контрастность аномалий [3]. В работе [9] указано на полезное «свойство» V фиксировать мафические породы и обогащать некоторые слюды, иногда ассоциированные с эпитермальным золотом.

Аномалии *редкоземельных элементов* в растениях использованы для выявления скрытых контактов разных типов коренных пород; часто фиксируются повышенные концентрации группы «легких» и отдельных REE над оруденением разных типов (например, Eu над сульфидной минерализацией, Nd по периферии золоторудной зоны) [9]. Недостатком REE как биоиндикатора можно считать их выраженную ассоциацию с железом.

Металлы платиновой группы присутствуют в биосфере в чрезвычайно малых количествах, практически на своих пределах определения, что для биоиндикатора одновременно является «плюсом» и «минусом». Практикуется интерпретация данных по Pt и Pd, коррелирующим между собой (из них Pd более мобилен в большинстве геохимических обстановок), а также с другими биоиндикаторами (Cu, Ni, Se, Te и др.); аномалии других PGE маловероятны [9].

Признаком оруденения определенных типов являются биогеохимические аномалии некоторых «специфических» следовых элементов, например, *селена* при поисках инфильтрационных урановых и сульфидных месторождений (также PGE), *германия* — при поисках некоторых типов полиметаллических руд [3, 9]. На порфировом Cu-Au месторождении в Канаде зафиксированы аномалии Se и Tl в пробах коры ели, существенно более контрастные по сравнению с другими биоиндикаторами — Cu, Pb, Rb, Cs, Ni, Au и Pt [6].

Могут быть полезны в качестве биоиндикаторов: *индий* (>20 ppb, в связи с рудами Sn, Zn, Cu-Fe-Pb), *гадолиний* (>0,3 ppm, в ассоциации с Zn, Cu, Ge, Al), *рений*, обычно сопутствующий Mo и/или PGE в растительности над рудными объектами (Cu-Mo-Au, PGE-Ni-Cu, кимберлиты; пространственно элементы тяготеют к структурным границам), *таллий*, ассоциирующийся в породах с K и Rb и часто обогащающий полиметалльные руды с попутными Au, Ag и др. (при поисках золота Tl может использоваться как дополнительный и даже более достоверный биоиндикатор,

если установлена ассоциация Tl-Au) [9]. Интенсивные биогеохимические аномалии Tl зафиксированы над скрытыми порфировыми Cu-Au рудами [6], Tl и Hg — над рудами SEDEX [12].

Во многих исследованиях обозначена важная индикаторная роль высокоподвижных элементов, образующих геохимические ореолы максимальной дальности [3, 9, 10 и др.]. Это элементы низкотемпературной ассоциации, типичной для фронтальных зон эндогенных ореолов рудных месторождений (I, Br, Hg, Sb, As, Ba и др.)⁵ (Н.Н. Трофимов, А.И. Рычков и др., 2010). Особое место среди них занимают галогены.

Почвенные ореолы *йода*, обычно изучаемые в связи с поисками месторождений золота, обнаружены на различных месторождениях (Маднеульском, Цителитинском и др.) с глубиной залегания руд до 300 м (Н.Н. Трофимов, А.И. Рычков). В условиях тайги лучшим концентратором I является кора сосны, по которой также обеспечивается геохимический контраст F, Cl и Br [10]. С. Dunn (2007) оценивает глубинность геохимических методов по I и Br на уровне 1000 м, им же отмечены аномалии Br над золотой минерализацией.

Ртуть считается универсальным индикатором гидротермальной минерализации, однако интерпретация аномальных ореолов ртути, по крайней мере, атмогеохимических, осложняется воздействием множества факторов; на поверхности аномалии ртути, как правило, имеют техногенное происхождение (И.И. Степанов, 1997), т.е. должны интерпретироваться критически. Ореолы Hg (совместно с Tl) в растениях над Pb-Zn рудами (SEDEX) выявлены С. Dunn и др. (2009).

Другие элементы используются в качестве биоиндикаторов не систематически, их аномальные содержания в растениях упоминаются в работах [3, 6, 9, 14 и др.] в связи с поисками руд: В (SEDEX), Ba (REE-алланитовая минерализация, сульфидные руды, Au, U типа «несогласия» и др.), Be (REE-пегматиты и др.), Fe (Fe-Au-As-Sb-Cr), Li (REE), Rb (порфировые Cu-Au), Rb и Sr (некоторые кимберлиты), REE (REE, кимберлиты, Au и др.), S (Ag-Au), Sn (Au-As-Sb, Pb-Zn, Pb-Zn-Ag-Cu-U, некоторые кимберлиты), Sr (Co-Sr в ультрамафитах, Au), Cs (Au, порфировые Cu-Au)⁶, Te (кимберлиты, Au), Th (PGE, Ni, Au), Zn (Pb-Zn). Среди них представляется недооцененной индикаторная роль *бария* — достаточно подвижного элемента с очень высоким абсолютным разбросом (AP) кларков (AP=4000)⁷, поглощаемого растениями до высоких концентраций.

Биогеохимические вариации наиболее распространенных химических элементов, в том числе типоморфных, в основном привлекаются для интерпрета-

⁵ Для некоторых типов месторождений золота низкотемпературный комплекс может включать W, Bi, Sn, Mo, Cu, Zn, Pb, Au, As, Sb, Ba и Hg.

⁶ По С.Е. Dunn, 2007, несмотря на химическую близость K, Cs и Rb, в растительных объектах обычно нарушается корреляция K-Cs, а над цезийсодержащим оруденением — Cs-Rb.

⁷ По данным В.А. и А.В. Алексеенко, 2013.

Таблица 1

Среднемировые содержания (С) химических элементов в растениях (в сухой массе, без учета каких-либо факторов) и пределы определения (ПО) аналитических методов, используемых для измерения содержаний этих элементов крупнейшими лабораториями

Элементы	С ^(а)	ПО ^(б)	Элементы	С ^(а)	ПО ^(б)
C	44,5 %	---	Gd	40 ppb	0,002 ppm ^(с)
O	42,5 %	---	Sm	40 ppb	0,003 ppm ^(с)
H	6,5 %	---	Dy	30 ppb	0,002 ppm ^(с)
N	2,5 %	---	Ag	20 ppb	5 ppb–10 ppm
K	1,9 %	10 ppm–5 %	Er	20 ppb	0,002 ppm ^(с)
Ca	1 %	20 ppm–5 %	Hg	20 ppb	2 ppb–50 ppm
S	0,3 %	5 ppm–1 %	Sc	20 ppb	0,01 ppm ^(с)
P	0,2 %	5–5000 ppm	Se	20 ppb	0,005 ppm ^(с)
Mg	0,2 %	10 ppm–2 %	Te	20 ppb	5 ppb–50 ppm
Cl	0,2 %	0,1 ppm ^(с)	Tl	20 ppb	2 ppb–50 ppm
Si	0,1 %	---	Yb	20 ppb	0,003 ppm ^(с)
Mn	200 ppm	0,5–2000 ppm	Bi	10 ppb	2 ppb–100 ppm
Fe	150 ppm	5 ppm–5 %	Ge	10 ppb	0,005 ppm ^(с)
Na	150 ppm	20 ppm–5 %	U	10 ppb*	0,5 ppb–2000 ppm
Al	80 ppm	5 ppm–2 %	Eu	8 ppb	0,002 ppm ^(с)
Rb	50 ppm	0,01–500 ppm	Ho	8 ppb	0,001 ppm ^(с)
Sr	50 ppm	0,05–2000 ppm	Tb	8 ppb	0,001 ppm ^(с)
Zn	50 ppm	0,2–2000 ppm	Th	5 ppb	5 ppb–500 ppm
B	40 ppm	2–1000 ppm	Tm	4 ppb	0,001 ppm ^(с)
Ba	40 ppm	0,05 ppm–1 %	Lu	3 ppb	0,001 ppm ^(с)
Cu	10 ppm	0,1–5000 ppm	Be	1 ppb	5 ppb–50 ppm
Ti	5 ppm	0,5–500 ppm	In	1 ppb	1 ppb–50 ppm
Br	4 ppm	0,02 ppm ^(с)	Ta	1 ppb	0,001 ppm ^(с)
I	3 ppm	0,002 ppm ^(с)	Au	0,2 ppb	0,5 ppb–10 ppm
F	2 ppm	0,05 ppm ^(с)	Pd	0,1 ppb	2 ppb–10 ppm
Cr	1,5 ppm	0,2–500 ppm	Re	0,1 ppb	0,5 ppb–50 ppm
Ni	1,5 ppm	0,1–2000 ppm	Ru	0,1 ppb	---
Pb	1 ppm	0,02–1000 ppm	Ir	0,01 ppb	---
Ce	0,5 ppm	5 ppb – 200 ppm	Rh	0,01 ppb	---
Mo	0,5 ppm	0,02–200 ppm	Pt	0,005 ppb	1 ppb–10 ppm
V	0,5 ppm	0,2–500 ppm	Os	0,0015 ppb	---
Co	0,2 ppm	0,02–200 ppm	Ra	0,00026 ppb ^{(д)**}	0,00006 ppb ^(ф)
La	0,2 ppm	2 ppb–200 ppm	Po	(1–6)·10 ⁻⁷ ppb ^{(е)***}	3·10 ⁻⁸ ppb ^(ф)
Li	0,2 ppm	0,02–500 ppm	Pa	(5)·10 ⁻¹² ppb ^{(г)*}	4·10 ⁻¹³ ppb ^(ф)
Nd	0,2 ppm	2 ppb–200 ppm			
Sn	0,2 ppm	0,02–50 ppm			
Cs	0,2 ppm	1 ppb–50 ppm			
W	0,2 ppm	0,02–50 ppm			
Y	0,2 ppm	5 ppb–50 ppm			
As	0,1 ppm	0,1–1000 ppm			
Ga	0,1 ppm	0,01–200 ppm			
Sb	0,1 ppm	0,01 ppm ^(с)			
Zr	0,1 ppm	0,05–50 ppm			
Cd	50 ppb	0,5 ppb–50 ppm			
Hf	50 ppb	2 ppb–50 ppm			
Nb	50 ppb	5 ppb–50 ppm			
Pr	50 ppb	0,001 ppm ^(с)			

^(а) значения приведены по С. Dunn (2007);

^(б) значения приведены по www.intertek.com;

^(с) значения приведены по alsglobal.com;

^(д) пересчет, по данным А.Л. и О.М. Ковалевских (2010);

^(е) пересчет, по данным Н.И. Ампелоговой (1976);

^(ф) оценка; ^(г) для ^{234m}Pa, пересчет, по данным С. Dunn (2007), при условии радиоактивного равновесия с ²³⁸U и ²³⁴Th;

* — соответствует 124 Бк/кг;

** — соответствует 94 Бк/кг;

*** — соответствует 19–93 Бк/кг

ции данных. В растениях *железо* может ассоциироваться со многими металлами-индикаторами (Co, Ni, Pb, U и др.), а *магний* — с Zn, Co и Cu [9]. Повышенные содержания *фосфора* в растительных объектах могут указывать на обогащенные им урановые руды и кимберлиты.

Эффективность опробования растительности на конкретных поисковых площадях зависит от информативности выбранных биоиндикаторов, поэтому в ходе опытно-методических работ особое внимание уделяют изучению биогеохимического фона, максимально усредненные характеристики которого приведены в табл. 1 (в таблице курсивом отмечены элементы с пределами определения близкими к фоновым значениям). Очевидно, что чем ближе локальный фон элемента к пределу его определения, и чем меньше точность и воспроизводимость анализа, тем надежнее результаты и их последующая интерпретация. Таким образом, приемлемые чувствительность и другие метрологические характеристики аналитических методов, обеспечиваемые, в том числе, максимальной стандартизацией процедур с введением референтных и холостых проб, должны быть известны заранее.

Среди объектов опробования предпочтение отдают «универсальным» по концентрирующим свойствам, наименее подверженным атмосферному загрязнению и временным вариациям, а также удобным для отбора, таким как внешняя кора и 2–3-летние части ветвей деревьев.

Результаты измерений содержаний (активности) обычно представляют на

Таблица 2
Геохимические характеристики некоторых рудных месторождений [17] и комплекс приоритетных биоиндикаторов

Тип месторождений	Основные элементы	Второстепенные элементы	Подвижные элементы ^(a)	Относительно слабоподвижные элементы ^(b)	Приоритетные биоиндикаторы
VMS	Fe, S, Cu, Zn, Pb	Cd, Hg, Au, As, Sb, Ba, Bi, In	Fe, S, Zn, Cu, As, Cd, Hg, Sb	Pb, Bi, In, Au, Ag, Ba	Pb, Au, Bi, Ag, As, Cd (Zn, Cu, Sb, Hg, Ba)
Порфировые Cu ± Mo	Cu, Mo, S	Fe, Ag, Au, Se, Re, As	Cu, Mo, S, Fe, Se, As, Re	Ag, Au	Au, Ag, As, Mo (Cu, Re, Se)
SEDEX	Fe, S, Cu, Zn, Pb	Ag, Au, Ba, Cd	Fe, S, Zn, Cu, Cd	Pb, Ba, Au, Ag	Pb, Au, Ag, Cd (Zn, Cu, B)
Au (жильное)	Au, Ag	As, Sb, Se, Te, S, Hg	S, Se, As, Hg, Te, Sb	Au, Ag	Au, Ag, As (Hg, Sb, Se, Te)
Ni-Cu-PGE	Ni, Cu, PGE	Cr, Co, S	Cu, S, PGE	Co, Ni, Cr	Co, Pt+Pd (Ni, Cu)
Алмазоносные кимберлиты	Sr, Nb, Ba, Cr, Ni	LILE, HFSE, REE	Sr, LILE	Ba, HFSE, Nb, Ba, Cr, Ni, REE	Pb, Nb, Ta, REE, Ba (Nb, Ni, Co, Ra, U, Th)
U («несогласия»)	Fe, S, Cu, Zn, Pb	Cd, Hg, Au, As, Sb, Ba, Bi, In	Fe, S, Zn, Cu, As, Cd, Hg, Sb	Pb, Bi, In, Au, Ag, Ba	²¹⁰ Po, ²¹⁰ Po/ ²¹⁰ Pb, ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb, общая α-активность, Pb, Au, Bi, Ag, U, Cd, As (Cu, Zn, Ba, Hg, Sb)

^(a) — в окислительной или нейтральной среде; ^(b) — в обычных условиях; LILE — литофильные элементы с большим ионным радиусом; HFSE — высокозарядные элементы; подчеркнуты индикаторы, биогеохимические ореолы которых, как правило, приближены к проекциям рудных тел; курсивом выделены индикаторы, обычно имеющие протяженные, менее контрастные биогеохимические ореолы; в скобках даны индикаторы, имеющие второстепенное значение в связи с высокими ПО, возможным атмосферным загрязнением и др.

сухую массу проб, т.к. это повышает контрастность аномалий, хотя при значительных вариациях зольности может быть полезен расчет на массу золы [3, 9].

При интерпретации результатов учитывают эффекты взаимного влияния химических элементов при их накоплении растениями, проявляющиеся в возникновении «разнознаковых» аномалий (например, в минимумах Cu и Mo в растительности над свинцовыми рудами [1], обратной зависимости Mo-Cu и Mo-Zn над медно-пирротиновыми колчеданными рудами [2]). При интерпретации аномалий Li следует учитывать возможное влияние карбонатизации, т.к. кальций ингибирует поглощение Li растениями [9].

Приоритетный список биоиндикаторов, которые могут быть рекомендованы для анализа и последующей интерпретации при опробовании растительности при поисках скрытого оруденения дан в табл. 2.

Отдельное направление в биогеохимии составляет разработка *методик частичной экстракции металлов с помощью бактерий*, позволяющих извлекать из литохимических проб только наименее прочно связанные формы рудных элементов и их спутников, т.е. нацеленных на выявление скрытых руд. Подобная процедура, с определением комплекса элементов (As, Bi, Cu, Ga, Ge, Ni, Sb, Se, Te, Ti, V, W), была эффективнее традиционного литохимического опробования на скрытых объектах Вайлдвуд (Au) и Ханимум (Ni) в Австралии (Noble R.R.P. «Locating ore undercover using a bacterial leach...», 2005). Аналогичная методика успешно применена для поисков порфировых Cu-Au руд;

над объектом, перекрытым рыхлыми отложениями и слоем базальтов, установлены высококонтрастные аномалии Br, I, Se и W, а также менее интенсивная аномалия Tl [6].

В некоторых регионах апробированы методики анализа нетрадиционных «биологических» объектов — термитников, преимущество которых реализуется в условиях субтропического климата с характерным выщелачиванием рудных элементов из почв и реголита (Н.Т. Chon, I.H. Hwang, 2007; J.G. Kinaichu et al., 2013; L.C.S. Reddy, 2014; P.Sinclair et al., 2017, и др.). В частности, масштабные работы на урановое оруденение типа «несогласия» проведены компанией «Самесо» в Австралии, по результатам которых в глинисто-органическом материале построены установленные аномалии U,

Cu, As и Dy. Положительные результаты опробования термитников получены при поисках руд Au в Австралии и Африке (Н.Т. Chon, I.H. Hwang, 2007; A.D. Stewart, R.R. Anand, 2012).

D.R. Heberlein et al. (2013) обратили внимание на перспективы анализа выделяемых растениями веществ (растительный сок и т.п.); над порфировыми Cu-Au рудами были установлены аномалии Cu, W, Hg, As.

С конца 1990-х годов используются *геомикробиологические методы*, основанные на извлечении и анализе состава и количеств присутствующих в почвах и породах микроорганизмов. Их основными задачами были обнаружение микроорганизмов-индикаторов скрытого оруденения и изучение процессов биохимического рассеяния элементов в перекрывающих породах и почвах. В работе [9] приведены основные виды достаточно сложных процедур с выделением из проб ДНК- и РНК-материала; в первом случае устанавливается наличие определенных генов, т.е. способность сообщества микроорганизмов катализировать определенную биохимическую реакцию, во втором — экспрессия генов, т.е. фактическая реализация этой реакции в момент отбора пробы. Эффективность поисковых геомикробиологических технологий, в частности, с ДНК-анализом микробиоты методом T-RFLP, доказана на рудных объектах Австралии (Cu-Au, IOCG) (Pohrib R., 2010), Мексики (полиметалльные руды 6 типов, в том числе золото-содержащие) (A. Melchiora, J. Cardenas, L. Dejonghea, 1994) и др. В настоящее время, с введением стандартных аналитических наборов, выполнение опробования

существенно упростилось. Доступным поисковым методом на урановое оруденение типа «несогласия» является *микробиологическое опробование (МЕТ)* с кислородной индикацией активности бактерий, извлеченных из почвенных проб промывкой водой; его глубинность достигает 400 и более метров [8, 13].

Выводы

Биогеохимические и микробиологические методы, преимущества которых во многом обусловлены спецификой механизмов формирования соответствующих ореолов в объектах окружающей среды, являются доступным и одним из наиболее эффективных инструментов поисков скрытых и слабопроявленных руд. Привлечение изотопных данных дает дополнительную информацию для последующей интерпретации аномалий, способствуя повышению ее достоверности. Многочисленные данные по биогеохимии рудных месторождений позволяют оценить индикаторную роль различных химических элементов и других показателей, выделить комплекс приоритетных биоиндикаторов оруденения, а также определить универсальные объекты опробования и оптимальные процедуры пробоподготовки. Необходимость предварительных опытно-методических работ объясняется существенной зависимостью результатов исследований от соотношений локального фона биоиндикаторов и пределов определения используемых аналитических методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеевко, В.А.* Проведение биогеохимических поисков месторождений полезных ископаемых / В.А. Алексеевко // Геохимия живого вещества: Международная молодежная Школа-семинар. — Томск, 2–5 июня 2013.
2. *Баба-Заде, В.М.* Молибден в древесной растительности Кехнамедан-Кацмалинского медно-пирротинового месторождения / В.М. Баба-Заде, Ф.М. Бабаев, С.А. Исаев и др. // ВАКИ UNİVERSİTETİNİN XƏBƏRLƏRİ, Təbiət elmləri seriyası. — 2013. — № 3. — С. 72–80.
3. *Ковалевский, А.Л.* Биогеохимия урановых месторождений и методические основы их поисков / А.Л. Ковалевский, О.М. Ковалевская. — Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2010.
4. *Титов, В.К.* Биогеохимические ореолы рассеяния урановорудных полей / В.К. Титов, И.А. Лучин, Б.П. Лашков и др. // Методы рудной геофизики. Геофизические и геохимические методы при оценке радиоактивных аномалий. — Л., 1988.
5. *Anand, R.* Use of biota in mineral exploration in areas of transported cover / R. Anand, M. Cornelius, C. Phang // 22nd IGES 2005. — Perth, Western Australia.
6. *Bissig, T.* Geochemical Techniques for Detection of Blind Porphyry Copper-Gold Mineralization under Basalt Cover, Woodjam Property, South-Central British Columbia / T. Bissig, D.R. Heberlein, C. Dunn (NTS 093A/03, /06): Geoscience BC Report, 2013–17 (2013).
7. *Cameron, E.M.* A pilot study for the use of lead isotopes to determine the genesis of anomalies in soil above buried VMS mineralization, Cross Lake / E.M. Cameron, B.L. Cousens, G.E.M. Hall.
8. *Centennial Deposit Surface Geochemical Study / Final Report / Griffiths D.* / Uravan Minerals Inc., 2014.
9. *Dunn, C.E.* Biogeochemistry in mineral exploration / C.E. Dunn // Handbook of exploration and environmental geochemistry 9 / Series editor M. Hale / ELSEVIER, 2007.
10. *Dunn, C.E.* Halogens in surface exploration geochemistry: Evaluation and development of methods for detecting buried mineral deposits / C.E. Dunn, S.J. Cook, G.E.M. Hall / Geoscience BC, Report 2005-008. — 69 pp.
11. *Dunn, C.* New Perspectives on Biogeochemical Exploration / C. Dunn // Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 2007. — P. 249–261.
12. *Dunn, C.* Element Distribution Patterns and Mineral Discoveries using Biogeochemical Methods / C. Dunn, R. Thompson, R. Anderson, A. Plouffe // Proceedings of the 24th IAGS, Fredericton, 2009. — P. 31–34.

13. *Geosphere-Biosphere Orientation Study over the Cigar West Unconformity Uranium Deposit in the Athabasca Basin of Northern Saskatchewan.* Final Report / G. Drever et al. / «Uravan Minerals Inc.», 2010.
14. *Hemmati, H.R.* Regional biogeochemical exploration in Southern Australia / H.R. Hemmati, A.R. Chivas // 22nd IGES 2005 / www.applied-geochemists.org.
15. *Holk, G.J.* Mobile Pb-isotopes in Proterozoic sedimentary basins as guides for exploration of uranium deposits / G.J. Holk, T.K. Kyser, D. Chipley et al. // Journal of Geochemical Exploration, 80 (2003). — P. 297–320.
16. *Hulme, K.A.* Biogeochemistry for mineral exploration in Canada & Australia: a comparison based on international collaboration / K.A. Hulme, C.E. Dunn, S.M. Hill // Regolith 2006 — Consolidation and Dispersion of Ideas / http://crclme.org.au/Pubs/Monographs/regolith2006/Hulme_K.pdf.
17. *Leybourne, M.I.* Groundwaters in Geochemical Exploration: Methods, Applications, and Future Directions / M.I. Leybourne, E.M. Cameron // Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 2007. — P. 201–221.
18. *Lintern, M.J.* Vegetation controls on the formation of gold anomalies in calcrete and other materials at the Barns Gold Prospect, Eyre Peninsula, South Australia / M.J. Lintern // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. — Vol. 7. — 2007. — P. 249–266.
19. *Paulen, R.C.* Isotopic fingerprinting of base metal indicator minerals to decipher their provenances: an example from northwest Alberta / R.C. Paulen, A. Plouffe, R. Smith, S. Paradis / https://www.researchgate.net/publication/270396260.

© Овсянникова Т.М., 2019

Овсянникова Татьяна Михайловна // lab@u238.ru

УДК 553.98

Берзин А.Г., Марсанова М.Р., Третьяков М.Ф. (ФГАОУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова), Берзин С.А. (Geco-Prakla, Schlumberger Ltd)

АКТИВИЗИРОВАННАЯ РАЗЛОМНАЯ ТЕКТНИКА И ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ УВ В ОСАДОЧНО-ПОРОДНОМ БАССЕЙНЕ НА ЮГЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Аргументируется, что формирование месторождений УВ в синхронных отложениях одного рифей-нижнепалеозойского осадочно-породного бассейна (ОПБ) на территории Непско-Ботубинской антеклизы происходило за счет субвертикальных флюидных потоков из подфундаментных источников и процессов переформирования залежей УВ между продуктивными пластами под влиянием периодической активизации разломных систем различной пространственной ориентации. Предполагается стадийность флюидонасыщения и формирования залежей вверх по разрезу. Залежи в продуктивных пластах терригенного комплекса венда формируются под влиянием активизаций разломов ранней северо-восточной, север-северо-восточной и субмеридиональной генераций, а в продуктивных карбонатных горизонтах венд-кембрия и нижнего кембрия — за счет переформирования залежей в отложениях венда под влиянием разломов поздней северо-западной генерации в зонах наложения на разломы более ранней генерации. Поиски залежей УВ в карбонатах рекомендуются на площадях, примыкающих к выделенным разломным системам.