

## ГЕОХИМИЯ И ТЕПЛОМАССОБМЕН В ЗОНАХ КРУПНЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ

**Вилор Н.В.<sup>1</sup>, Андрулайтис Л.Д.<sup>1</sup>, Зарубина О.В.<sup>1</sup>, Данилов Б.С.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, г. Иркутск, e-mail: vilor@igc.irk.ru,

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, e-mail: boris@crust.irk.ru

Современные крупные сейсмоактивные разломы – открытые системы, где происходит конвективный теплообмен с участием преимущественно водно-газового теплоносителя в зависимости от вещественно-структурного состояния геологической среды. Повышенный тепловой поток рифтогенных разломов Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) с сопутствующими многочисленными приразломными месторождениями горячих минеральных вод и интенсивный «уходящий поток инфракрасного излучения (УПИКИ)» отражают значение этих граничных структур как областей эмиссии эндогенной энергии в форме тепломассопереноса между атмосферой + гидросферой и поверхностью коры. Работа авторов ориентирована на выявление связи этого процесса, экспонируемого уходящим поверхностным ИК-поток, с переносом подвижных рудных элементов и их геохимическими потоками. В задачу исследования входит анализ природы УПИКИ, описание распределения подвижных рудных элементов в поверхностных образованиях зон динамического влияния разломов (ЗДВР) и расчет их потоков, фиксируемых благодаря формированию геохимических барьеров, в том числе при участии педосферы.

Инструментальной основой изучения природного феномена аномального УПИКИ являются изображения поверхности, полученные искусственными спутниками (ИС) Земли серий NOAA и EOS по тепловым каналам 3,7, 8 и 10-11 мкм от радиометров AVHRR и MODIS. Рассчитанный поверхностный тепловой поток  $F$  с размерностью [мВт] соответствует эффективному излучению поверхности разломов, в котором методом баланса выделены компоненты, соответствующие частным тепловым потокам: почв и грунтов –  $F_{sp}$ , конденсации водяного пара –  $F_{кон}$ , окисления почвенно-грунтовых газов –  $F_{фх}$ , доли тепла из верхней коры –  $F_{zl}$  и вклада лесных экосистем в гумидных областях –  $F_{эс}$ . Для изучения геохимии рыхлых образований на поверхности разломов проведено опробование по традиционной методике с отбором стандартных образцов массой до 500 г из почв, их иллювиальных горизонтов, грунтов и коренных пород. При опробовании рыхлых отложений на приразломном горячеводном месторождении Кучегер образцы грунтов взяты из мелких скважин глубиной до 80 см. Температуры грунта и воды на поверхности измерены с точностью до 0.5 °С. Концентрация газов почвенного воздуха в мелких бурках глубиной 30-40 см из поверхностных отложений ЗДВР и на горячих минеральных источниках определены газоанализаторами ОКА-92М (O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S) и ОКА-92Г (CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>) при абсолютных погрешностях для O<sub>2</sub> ± 0.1 об. %. Относительные погрешности для других газов ± 25 %. Ионизация приземного газа на поверхности грунта измерена малогабаритным счетчиком аэроионов МАС-01 для экспресс-определений концентрации легких (подвижность К > 0.4 см<sup>2</sup>/ В·с) положительных и отрицательных аэроионов. Диапазон измерения концентраций аэроионов обеих полярностей составляет 10<sup>2</sup>-10<sup>6</sup> см<sup>-3</sup>.

Выходы разломов трассируются непрерывными максимумами величин уходящего ИК потока, измеряемого ИС указанных серий, значения которого достигают 55 мВт/ м<sup>2</sup>·ср·мкм в диапазоне 10 мкм, и наибольшим уровнем яркости отраженного радиолокационного сигнала. В распределении средних содержаний изученной группы рудных элементов, включающей летучие As, Tl, Hg (табл.1), проявляется ранжирование по порядку величин. Устойчивые концентрации, обычно более или около 10 г/т, создаются В, Zn, Cu, Pb и As. Содержания на уровне 1-2 г/т свойственны Ge, Mo, Sn. На 1-2 порядка меньшие значения присущи Ag, Tl и Hg. Различия средних величин концентраций I-й подгруппы, условно «макроэлементов», значимы для бора и меди на Тункинском разломе. Для Баргузинского разлома характерен более высокий уровень содержания цинка. Краевой шов выделяется повышенной

Таблица 1

Средние содержания рудных элементов (г/т) в поверхностных отложениях крупных региональных разломов БРЗ

Разлом	n	сред. сод.	B	Cu	Zn	Pb	As	Ge	Mo	Sn	Ag	Tl	Hg	Co	Cr	Ni	V
Тункинский	88	X ср	<b>42.134</b>	<b>34.210</b>	75.401	13.916	11.672	1.205	1.985	2.646	0.267	0.883	0.075	16.14	<b>80.67</b>	<b>67.85</b>	68.28
		±σ	2.002	1.328	1.121	1.315	1.625	0.446	1.350	0.998	0.285	1.086	0.193	1.33	1.63	1.65	1.39
Баргузинский	75	X ср	14.357	25.908	<b>112.061</b>	17.976	6.146	1.161	1.556	3.103	0.180	0.754	0.020	16.77	51.08	39.54	<b>94.77</b>
		±σ	1.134	1.182	1.053	1.036	1.334	0.336	1.254	1.007	0.129	0.415	0.010	1.01	1.09	1.07	1.02
Краевой шов Сибирской платформы	91	X ср	20.629	22.865	69.659	12.419	<b>17.397</b>	1.216	1.256	2.310	0.287	0.862	<b>0.595</b>	не определены			
		±σ	2.152	1.287	1.251	1.591	2.218	0.589	1.825	1.244	0.339	1.435	1.545				
Геотермальное поле Кучегер	65	X ср	20.341	23.974	88.653	18.256	14.294	<b>3.884</b>	1.14 9	2.243	<b>0.741</b>	0.614	0.050	11.96	42.05	35.93	60.31
		±σ	1.131	1.338	1.193	1.109	1.616	1.738	1.097	1.154	1.490	0.483	0.225	1.13	1.12	1.16	1.11

Примечание: выделены повышенные уровни содержаний

Таблица 3

Рудные элементы - показатели геохимической специализации региональных разломов БРЗ

Разлом	Показатели геохимической специализации						
	по среднему содержанию элементов, г/т	по фону, г/т	по дисперсии, $F_1 / F_2$		по геохимической ассоциации		
			на 9 элементов	на 15 элементов	9 элементов	15 элементов	Главные/второст.
Тункинский	B, Cu, Cr	B, Cu	Ge, B/Tl, Mo	B / Mo	Tl, <b>Ag, Mo</b> , B	Hg, As, <b>Ag, Mo</b>	<b>Ag, Mo</b> / Hg, As, Tl
Баргузинский	Zn, V	Zn, V	Ag, Cu/Pb, Tl	Ni, As/Pb, Mo	<b>Tl</b> , Cu, Ag,	Mo, As, <b>Tl</b>	<b>Tl</b> / Cu, Ag, As
Краевой шов Сибирской платформы	As, Hg	Hg	Cu, Zn/Tl, Mo	Mo, As/Zn	<b>Mo</b> , Tl, <b>Ag</b>	<b>Mo</b> , Hg, As, <b>Ag</b>	<b>Mo, Ag</b> / Tl, Hg, As
Приразломное термальное поле Кучегер	Ge, Ag	Ge, Ag	не рассчитано	Zn, Pb/V, Co	не рассчитано	<b>Hg, Ag</b> , Mo, <b>Ge</b>	<b>Hg, Ag, Ge</b> / Mo

Примечание: 1. при анализе дисперсии в числителе –  $F_1$ , в знаменателе -  $F_2$ , 2. жирным шрифтом выделены главные элементы геохимических ассоциаций

мышьяковистостью. Различия концентраций во II-й подгруппе (Ge, Mo, Sn) малозначимы за исключением геотермального поля Кучегер, характеризующегося относительно повышенным содержанием Ge. Прямым следствием повышения тепловых потоков на рифтогенных региональных разломах БРЗ являются приразломные геотермальные поля. В зоне динамического влияния Баргузинского разлома горячеводное месторождение Кучегер связано с пересечением основного разлома и поперечного сброса северо-западного простирания, ограничивающего северо-восточное замыкание долины. Тепловой поверхностный поток на площади месторождения около 0.12 км<sup>2</sup> достигает 74 Вт/м<sup>2</sup>. Из просачивающихся растворов в юго-восточной части термального поля отлагается минеральная соль, представленная субстехиометрическим *мирабилитом* Na<sub>1.972</sub>SO<sub>0.9967</sub>O<sub>4</sub>. Величина глубинной компоненты ПТП ( $F_{гг}$ ) определена как разность:  $F_{гг} = F - (F_{гп} + F_{гк} + F_{гф} + F_{гс})$ . На разломах рассчитаны доли  $F_{конд}$  и  $F_{конв}$  (табл. 2). Конвективный теплоперенос существенно преобладает в поверхностной части ЗДВР, особенно на восходящей ветви конвективного цикла.

Таблица 2

Поверхностный тепловой поток изученных региональных разломов

Разлом	Яркостный поток, $L$ мВт/м <sup>2</sup> .ср.мкм	Поверхностный тепловой поток, ПТП, $F$ , мВт	Глубинная компонента ПТП, $F_{гг}$ , мВт	Части $F_{гг}$ , мВт		Доля конвективной части
				конвективная, $F_{конд}$	кондуктивная $F_{конв}$	
Тункинский	103.027	707.84	323.37	25.46±4.14	297.86±4.18	0.92
Баргузинский	85.466	587.19	362.14	25.44±2.69	336.71±2.7	0.93
Приморский	112.242	771.15	339.36	20.94±1.67	318.42±1.67	0.94
Краевой шов Сибирской платформы	103.64	708.09	289.62	18.79±0.8	270.86±0.77	0.94

Подвижные рудные элементы рассматриваются как геохимические индикаторы приразломного массопереноса. Геохимическая специализация разломов заключается, с одной стороны, в повышении средних содержаний и фонов (значение 50% накопленной частоты) (табл. 3), обусловленном влиянием исходных субстратов, по которым заложены разломы. С другой стороны, статистически обоснованное выделение собственных геохимических ассоциаций по имеющимся выборкам проб с применением факторного анализа дает разделение совокупности данных по уровню дисперсии в каждом объекте на две независимые группы элементов, среди которых первая, наиболее значимая – фактор  $F_1$  интерпретируется как ассоциация рудных элементов субстрата, *автохтонов*, а вторая – фактор  $F_2$  – как ассоциация привнесенных элементов – *аллохтонов*. Путем классификации данных с использованием многомерного анализа геохимических полей на основе метода главных компонент в выборках из моноэлементных классов учтены только те, в которых содержатся наивысшие коэффициенты концентрации КК (отношение концентрации к фону) с наибольшим числом точек – проб. Таким образом, определены геохимические ассоциации наиболее подвижных рудных элементов – элементов II и III групп, коррелирующие с главными факторами  $F_1$  и  $F_2$ . Очевидно, что в геохимических ассоциациях главное значение на Тункинском разломе и краевом шве платформы принадлежит Ag и Mo, на Баргузинском – Tl, в термальном поле Кучегер – Hg, Ag и Ge. В горизонтах поверхностных образований концентрации рудных элементов локально повышаются на 2-х видах комбинированных геохимических барьеров: 1. верхнем испарительно-сорбционном гумусо-почвенном; 2. нижнем сорбционном, окислительно-восстановительном в слоях ожелезнения (накопление на тонкодисперсном гидроксиде железа и Mn, на Fe глинисто-органическом комплексе). Корреляция рудных элементов с  $S_{орг}$  отмечалась исследователями и ранее. Особое значение геохимического барьера имеет торфяная залежь термального поля Кучегер. В его нагретом торфянике на верхнем сорбционно-испарительном геохимическом барьере накапливаются

As, W, Ge, частично Mo, а на нижнем сорбционном сульфидно-глеевом – Tl, V, Pb, частично Zn и Cu.

Приразломные геохимические потоки рудных элементов сопутствуют конвективной части ПТП при тепломассопереносе по ЗДВР. Расчет проведен с учетом геохимических барьеров и временных отметок их образования. Поток  $\Pi$  равен:  $\Pi = M / (S \cdot t)$ , где  $M$  – масса, кг,  $S$  – площадь, км<sup>2</sup>,  $t$  – время формирования геохимического барьера, лет. Вычисления включают следующие количественно оцениваемые параметры:

1.  $C_{ком}$  – содержание компонента на барьере (почва, Fe – грунт, мг/кг),
2.  $t$  – время накопления разреза в почве 400 лет, в Fe – грунте 2107 лет в горизонте В на краевом шве, на Тункинском и Баргузинском разломах 2772 года и 3100 лет соответственно, на термальном поле Кучегер 770 лет [Чипизубов и др., 2003; Лунина и др., 2009]
3.  $h$ , см – толщина барьера в горизонте А равна 7, в горизонте В – 30 и 27.17 – на верхнем торфе и 26.92 на нижних глинах и песках в Кучегере.
4.  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность материала 1300 в горизонте А, 1800 в горизонте В, на Кучегере 1200 и 1800 соответственно. Рассчитанные геохимические потоки рудных элементов в концентрационном ряду: мышьяк → таллий → ртуть уменьшаются примерно на порядок (табл. 4).

Таблица 4.

Геохимических потоки рудных элементов на крупных региональных разломах Байкальской рифтовой зоны

Разлом	Потоки, кг / км <sup>2</sup> · год						ПТП, мВт	F гл, мВт
	As	Tl	Hg	Ag	Mo	Ge		
Тункинский	3.252	0.226	0.020*	0.089	0.189	не опр	707.84	323.37
Баргузинский	0.879	0.139	0.013*	не опр.	не опр.	не опр	587.19	362.14
Краевой шов Сибирской платформы	1.671	0.229	0.037* 0.055**	0.018	0.139	не опр	708.09	289.62
Термальное поле Кучегер	21.440*	0.413**	0.021*	0.479*	не опр	7.267*	74 Вт/м <sup>2</sup>	9.5 МВт максимал

Примечание: \* – на почве и верхнем торфе, \*\* – на Fe – части основания слоя В.

Поток ртути по разломам соответствует интервалу, который приближенно оценен в [Коваль и др., 2006] для БРЗ на уровне 0.0056-1.2 кг/км<sup>2</sup>·год. Тенденция зависимости концентрационных потоков от интенсивности ПТП и поверхностного теплопотока термального поля отражает процесс тепломассообмена на крупных сейсмоактивных тектонических нарушениях. Использованный способ расчета спутниковых измерений оценивает ПТП, эндогенная часть которого содержит значительную конвективную составляющую теплопереноса по ЗДВР с участием теплоносителя – водно-парогазовой субстанции. Приразломный конвективный теплопоток инициирует миграцию подвижных рудных элементов, геохимические потоки которых включают природные токсиканты As, Tl, Hg, а также Mo, Ag, Ge и радиогенный Rn. Они являются элементами «дыхания» сейсмоактивных рифтогенных разломов.

### Литература

Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Саньков А.В., Ясеновский А.А., Андрулайтис Л.Д. Геохимическая активность разломов Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН. 2006. т. 409. № 3. С. 389-393.

Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Академическое издательство «Гео». 2009. 316 с.

Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М. Палеосейсмодислокации и связанные с ними землетрясения в зоне Тункинского разлома // Геология и геофизика. 2003. т. 44. № 6. С. 587-602.