

## ПОРОДЫ ИЗ ЙЕЛЛОУСТОУНСКОЙ ГОРЯЧЕЙ ТОЧКИ

Е. И. Богданова, Е. Н. Волчек, О. С. Березнер

Йеллоустоунская горячая точка – одно из немногих внутриконтинентальных проявлений плюмового магматизма – расположена на СЗ США, в центре Скалистых гор. Благодаря хорошо сохранившимся фумарольным полям и самым крупным на Земле гейзерам, связанным с супервулканом, возраст которого оценивается в 70 тыс. л., еще в XVIII в. здесь был образован первый в мире национальный парк “для пользы и удовольствия народа”. В настоящее время Йеллоустоунский национальный парк является подлинной американской туристической Меккой, посещаемой ежедневно 10 тысячами туристов.

Нет необходимости говорить, что для геолога великолепные обнажения контрастных вулканических пород, слагающих современную горячую точку, – объект не менее притягательный, чем гейзеры и гризлы. При посещении Йеллоустоуна возникает сильное желание увезти некоторое количество образцов для близкого ознакомления и возможно более подробного изучения результатов деятельности этого практически живого плюма. Следует отметить, однако, что отбор образцов в Йеллоустоуне сопряжен с немалыми трудностями, главной из которых является лозунг: “Первозданная природа Йеллоустоуна – священная природа Америки”. Находясь постоянно под наблюдением десятков глаз законопослушных американцев, довольно трудно ухитриться урвать кусочек “священной природы”, поэтому мы надеемся, что читатель благосклонно простит фрагментарность и неполноту описываемых материалов.

Йеллоустоунская горячая точка замыкает с северо-востока долину Снейк Ривер, вулканические образования которой возрастом от 13 до 1 млн. лет считаются следом плюма, оставленным в результате смещения североамериканской плиты в юго-западном направлении. Понижение долины Снейк-Ривер к юго-западу некоторые исследователи рассматривают как доказательство постепенного остывания термального поля горячей точки. Большую часть Йеллоустоунского национального парка занимает слегка вытянутая в северо-восточном направлении кальдера потухшего вулкана длиной около 60 и шириной около 40 км. Она представляет собой довольно выровненное плато с отдельными небольшими возвышенностями, погружающееся к юго-востоку, где располагаются многочисленные озера причудливой конфигурации, среди которых выделяются самое большое озеро Йеллоустоун и значительно меньшее – Шошон. Внутри кальде-

ры располагаются все фумарольные поля и знаменитые гейзеры, а среди окружающих ее хребтов – великолепные коренные обнажения.

Первым сильным впечатлением при подъезде к Йеллоустоуну с юго-запада, является возвышающееся над цветущей долиной темное, почти черное, издали безжизненное вулканическое плато, которое кажется овеществленным воплощением виртуального мантийного плюма. Внутри же этого вулканического сооружения породы в основном окрашены в светлые тона, причем светлым, желтоватым от гидроокислов железа цветом отличаются выветрелые поверхности не только преобладающих здесь игнимбритов, но и перемежающихся с ними потоков базальтоидов. Последние, повсеместно имеющие очень четкую и равномерную столбчатую отдельность, образуют эффектные галереи, выступающие среди рыхлых пирокластических отложений. В случае, когда базальтовый поток является замыкающим извержением, т.е. перекрывает сверху рыхлые верхние части игнимбритовых наслоений, невозможно отделаться от впечатления, что выступающие высоко на фоне неба идеально равномерные столбики, ограниченные снизу и сверху абсолютно параллельными горизонтальными поверхностями, как раз и являются ограждением национального парка.

Еще более сильное впечатление оставляют обнажения, где на базальтоидах с довольно грубой столбчатой отдельностью залегают нижние, сильно сваренные части игнимбритовых отложений, также обладающих столбчатой, но более изящной отдельностью, причем ширина столбов кверху постепенно уменьшается. При высоте такого обнажения до 70–100 м напрашивается сравнение с гигантским органом. Необыкновенно интересным оказывается осмотр собственно игнимбритовых полей, наблюдение постепенного перехода вверх по разрезу потока тонко-столбчатой отдельности в карандашную, а затем и в игольчатую, когда среди рыхлой, сыпучей дресвы выступают отдельные тонкие столбики заостряющиеся кверху.

Образцы были отобраны в 10 точках, в основном по периметру границы Йеллоустоунского национального парка. Три образца взяты в юго-восточной части Парка, на западном склоне хребта Абсарака, в районе расположения национально леса Шошон, остальные – из различных обнажений, вдоль шоссе-соединяющей наиболее эффектные (spectacular) пункты наблюдений. Из всех образцов

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) пород из Йеллоустоунской горячей точки

	№ обр.					
	Уе-2-1	Уе-2-2	У-2-3	Уе-4-1	У-5	У-8
SiO <sub>2</sub>	73.02	63.19	59.22	75.14	50.54	73.31
TiO <sub>2</sub>	0.158	0.592	0.692	0.111	3.122	0.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.2	16.24	16.82	11.35	14.8	12.13
Fe <sub>общ</sub>	2.28	5.05	5.8	1.67	13.53	1.89
MnO	0.044	0.131	0.081	0.04	0.088	0.068
MgO	0.25	3.61	3.75	0.18	2.11	0.28
CaO	0.55	4.56	5.3	0.65	7.94	0.54
Na <sub>2</sub> O	6.4	3.2	3.5	6.4	2.8	5.5
K <sub>2</sub> O	4.76	1.98	2.34	4.53	0.51	4.7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.27	0.42	0.02	0.41	0.02
V	0.002	0.007	0.009	0.002	0.037	0.002
Cr		0.001	0.001		0.002	
Ппп	0.5	0.9	2.1	0.3	3.8	0.9
Сумма	100.14	99.74	100.02	100.36	99.73	99.59

Примечание. Аналитические исследования были выполнены в лаборатории ФХМИ ИГТ УрО РАН рентгеноспектральным флуоресцентным методом: все окислы, кроме Na<sub>2</sub>O, – на СРМ-18, Na<sub>2</sub>O – на EDX- 900HS.

были изготовлены шлифы, а 6 наиболее свежих – проанализированы (табл. 1–2).

Наибольшие надежды при отборе образцов возлагались на отрог хр. Абсарока, откуда хотелось привезти эталонные образцы абсарокитов или, на худой конец, шошонитов (не зря же здесь расположен и Национальный лес Шошон). Хотя во всех словарях указывается, что шошониты ведут свое происхождение от р. Шошон, на имеющихся туристических картах такая река отсутствует. Из озера Шошон, у южной границы Парка, вытекает несколько ручьев, один из которых, возможно, и послужил отправной точкой для такого суждения. К сожалению, в этом месте нам побывать не удалось.

Осмотренные нами делювиальные развалы юго-западного отрога хр. Абсарока были представлены преимущественно игнимбридами (обр. Уе-2-1), не отличающимися от большинства пород Йеллоустоуна. Лишь в одном месте игнимбриды пересекала дайка более основных по составу порфиритов (обр. Уе-2-2) и отдельный небольшой отрог хребта оказался сложным темно-серыми мелкозернистыми кристаллическими породами интрузивного или субвулканического облика (обр. У-2-3).

Образец породы основного состава, как нам представляется, типичной для потоков, чередующихся с игнимбритовыми толщами, взят в северной части парка, у подножья “небесного органа” напротив горы Замок Рузвельта, вблизи отмеченного на всех туристических картах “Окаманевшего дерева”. Все остальные образцы, отобранные в разных точках, представляют собой игнимбриды разной степени гомогенизации либо автомагматические брекчии, причем состав их, как выяснилось, почти идентичен.

Все проанализированные нами кремнекислые породы Йеллоустоуна (обр. Уе-2-1, У-4-1 и У-8) имеют трахириолитовый состав, отличаясь лишь

незначительными колебаниями в содержании петрогенных компонентов и элементов-примесей (табл. 1–2). Это, преимущественно витро-кристалло-литокластические породы, основную массу которых составляют так называемые “игнимбритовые рогульки” с аксиолитовой структурой, создаваемой радиально-лучистыми волокнами калишпата. Пластически изогнутые рогульки, как правило, плотно примыкают друг к другу и, в зависимости от степени сваренности и гомогенизации материала, либо хаотически ориентированы, либо удлиняются в одном направлении, образуя зачаточную флюидальную текстуру. Местами такая текстура переходит в истинно флюидальную, когда вытянутые пирокластические частицы утрачивают ограничения и превращаются в протяженные полосы. Иногда все три разновидности подобных текстур можно наблюдать в одном шлифе. Кристаллокласты могут составлять до 20–25% породы, они представлены осколками вкрапленников, реже – вкрапленниками кварца, ортоклаза (2V = 50–60°), возможно, санидина, изредка плагиоклаза, и единичных мелких выделений клинопироксена. Обломки пород размером иногда до 12 мм (лапилли), чаще 0.5–1 мм представлены преимущественно кремнекислым стеклом с флюидальной, местами перлитовой текстурой, но иногда имеют более основной состав – андезитовый, диорит-порфиритовый с плагиоклазом, клинопироксеном, возможно, оливином и обильной рудной пылью.

Как уже упоминалось, петрохимический состав отобранных нами кремнекислых пород Йеллоустоуна не отличается разнообразием. Они содержат 73–75% SiO<sub>2</sub>, 0.1–0.2% TiO<sub>2</sub>, 11–12% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.7–2.3% Fe<sub>общ</sub>, 0.18–0.28% MgO, 0.54–0.65% CaO. Благодаря высокому содержанию щелочей (10–11%), на диаграмме TAS (SiO<sub>2</sub>–(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)) [1] эти вулканы попадают в поле щелочных пород, что по-

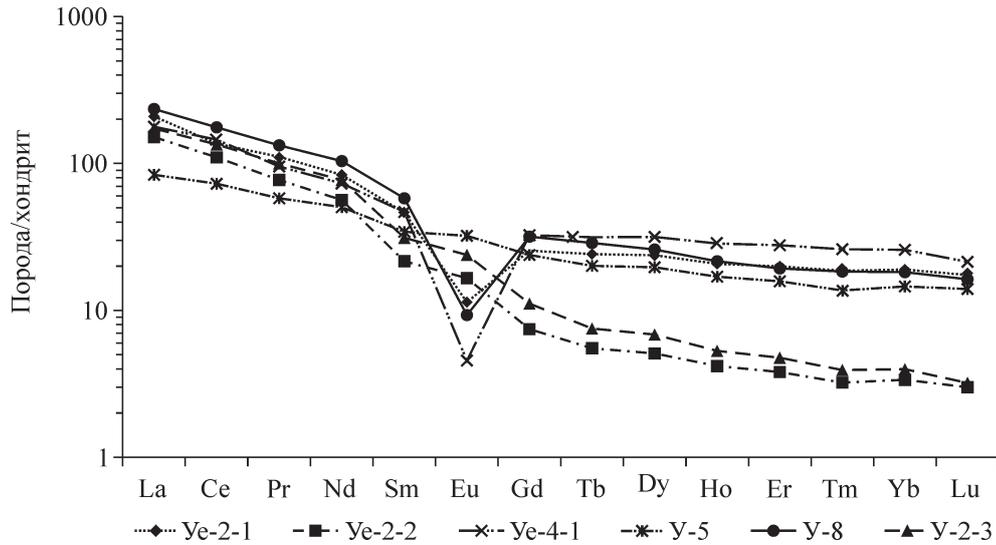
**Таблица 2.** Элементный состав (г/т) и некоторые параметры пород из Йеллоустоунской горячей точки

	№ обр.					
	Уе-2-1	Уе-2-2	У-2-3	Уе-4-1	У-5	У-8
La	68.651	49.776	57.059	58.513	27.599	77.389
Ce	118.135	94.983	116.586	125.449	62.968	152.555
Pr	14.459	10.022	13.043	12.382	7.527	17.273
Nd	52.700	35.585	48.563	46.182	31.806	65.337
Sm	9.387	4.382	6.345	9.501	6.956	11.785
Eu	0.874	1.279	1.832	0.351	2.481	0.715
Gd	7.050	2.057	3.076	8.956	6.587	8.769
Tb	1.201	0.275	0.375	1.570	1.000	1.435
Dy	8.124	1.747	2.348	10.827	6.756	8.900
Ho	1.599	0.321	0.408	2.195	1.303	1.662
Er	4.491	0.856	1.072	6.242	3.548	4.334
Tm	0.656	0.114	0.138	0.919	0.482	0.646
Yb	4.164	0.742	0.875	5.686	3.203	4.011
Lu	0.591	0.102	0.109	0.725	0.475	0.552
(La/Lu) <sub>n</sub>	11.96	50.43	53.93	8.31	5.99	14.43
Li	14.812	9.686	12.047	28.378	8.201	6.671
Be	3.882	1.256	1.243	4.979	1.056	3.395
Na	54919.963	71844.205	63597.633	54815.304	50177.120	50435.855
Sc	1.791	7.826	8.630	1.492	32.265	2.371
Ti	973.051	3098.810	3687.311	672.444	15241.856	946.250
V	1.146	71.748	85.530	1.882	256.571	0.998
Cr	0.840	40.487	26.923	2.046	26.068	0.426
Mn	182.134	738.865	386.275	143.248	502.237	263.856
Co	0.456	10.233	11.324	0.518	27.567	0.466
Ni	0.349	23.002	16.914	0.873	23.291	0.988
Cu	4.197	16.113	10.447	6.878	46.750	7.714
Zn	96.389	76.721	43.488	48.229	134.506	51.799
Ga	24.351	20.423	19.088	22.724	25.201	20.788
Ge	1.344	0.947	0.877	1.517	0.758	1.352
Rb	234.600	45.149	39.865	270.592	7.434	200.739
Sr	18.296	1060.937	1449.478	12.712	395.267	39.740
Y	39.536	8.497	10.523	60.108	32.972	35.180
Zr	172.815	31.556	36.792	50.515	198.221	180.402
Nb	59.574	6.931	8.507	54.876	22.596	47.462
Mo	2.796	0.429	0.419	2.874	0.935	3.104
Ag	1.527	0.353	0.430	1.452	0.695	1.246
Cd	0.182	0.247	0.056	0.062	0.242	0.079
Sn	5.244	1.253	1.001	5.063	2.520	6.089
Sb	0.164	0.083	0.193	0.194	0.061	0.236
Te	н/о	0.018	н/о	н/о	н/о	н/о
Cs	2.572	1.850	1.154	3.107	0.118	5.006
Ba	408.018	1798.041	2143.662	126.788	509.104	352.670
Hf	6.424	0.790	1.333	2.220	5.053	6.425
Ta	3.787	0.389	0.468	3.909	1.437	3.310
W	2.192	0.732	0.627	2.399	0.411	2.158
Tl	0.719	0.328	0.380	0.674	0.031	0.536
Pb	28.278	28.289	14.658	27.049	5.410	25.281
Bi	0.028	0.035	0.058	н/о	0.020	0.230
Th	24.104	7.523	7.213	22.862	3.276	23.459
U	4.530	1.543	1.519	3.383	0.787	4.452

Примечание. Аналитические исследования были выполнены в лаборатории ФХМИ ИГГ УрО РАН, данные по микроэлементам получены методом ICP-MS.

зволюет отнести их к риолитам повышенной щелочности, или трахириолитам, по классификации ВСЕГЕИ [2] с небольшим преобладанием Na ( $K_2O/Na_2O = 0.65-0.85$ ). Так же незначительно раз-

личаются эти, отобранные в разных местах Парка, игнимбриты и по геохимическим чертам. Как и все породы Йеллоустоуна, они характеризуются высокой суммой РЗЭ, отчетливым V-образным

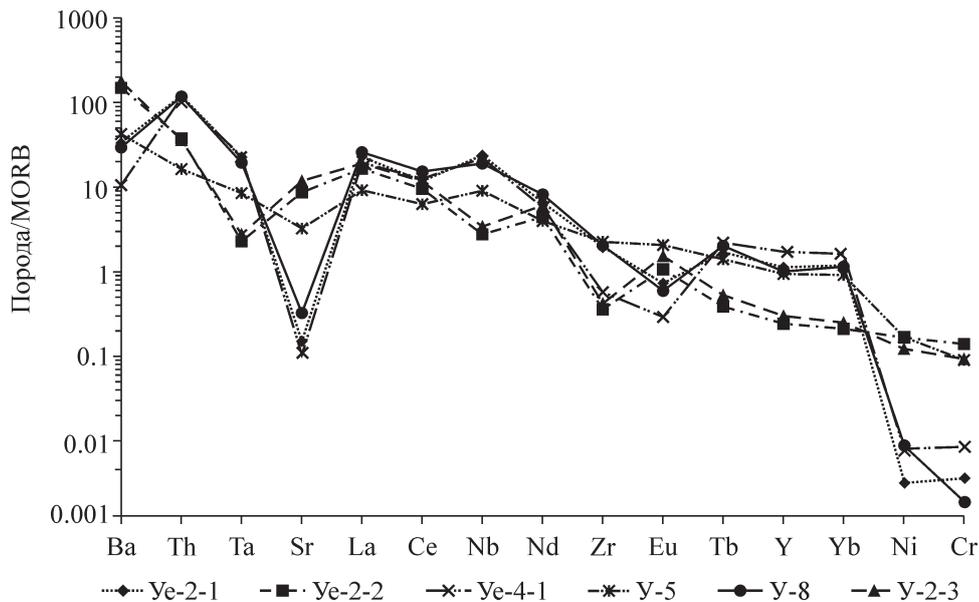


**Рис. 1.** Распределение РЗЭ, нормированных по хондриту [4], в исследованных образцах пород Йеллоустоунского национального парка.

трендом со слабым наклоном кривой распределения элементов, нормированных по хондриту  $(La/Lu)_n = 8.4-11.3$  (табл. 2, рис. 1). Из других геохимических особенностей можно отметить низкие содержания Sr и повышенные – Nb (рис. 2).

Основные вулканы из потоков базальтоидов, перемежающихся с игнимбритами представлены одной пробой (Y-5). Это оливин-клинопироксеновый (двупироксеновый?) базальт афировой микроделитовой и интерсертальной структуры. Лейсты плагиоклаза двух генераций (ранние – до 0.5 мм) составляют не менее 60–70% породы. В промежутках между ними – в основном бурое стекло с обильной рудной вкрапленностью, отдельными очень мелки-

ми выделениями высоко двупреломляющих темноцветных минералов. Из петрохимических особенностей следует отметить высокое содержание  $Fe_{общ}$  (13.53%) и CaO (7.94%) и низкое – MgO (2.11%). Кривая распределения РЗЭ, нормированная по хондриту, практически сливается с таковой для кремнекислых пород в области тяжелых РЗЭ, и отличается лишь несколько меньшим содержанием лантаноидов и отсутствием европиевого минимума (рис. 1). По содержанию других микроэлементов, нормированных по MORB, кривая распределения также демонстрирует сродство базальтов и вышеописанных кремнекислых пород. Для них также характерно пониженное содержание Sr и повышен-



**Рис. 2.** Распределение элементов-примесей, нормированных по N-MORB [3], в исследованных образцах пород Йеллоустоунского национального парка.

ное – Nb (рис. 2). Резко отличаются они только по содержанию Ni и Sr, что вполне естественно.

Породы среднего состава из хр. Абсарока (обр. Уе-2-2 и У-2-3) представлены кварц-диоритовыми порфиридами и лейкодиоритами. Первые образуют дайку, секущую игнимбритовые отложения. Это серые обильно порфировые породы – идиоморфные таблички зонального плагиоклаза составляют не менее 50–60%; 15–20% занимают темноцветные минералы, в интерстициях между ними – фельзитовидный, а местами микрогранофировый кварц-полевошпатовый агрегат. Среди темноцветных минералов преобладает бурый амфибол, корродируемый с краев мелкочешуйчатым коричневым биотитом, возможно, в виде единичных зерен присутствовал также пироксен, полностью замещенный сейчас бесцветным амфиболом-2. Очень редко встречаются реликты зерен магматического биотита, также замещаемого мелкозернистым биотитом-2. Не менее 3–5% породы составляют мелкие выделения рудного минерала.

Лейкодиориты слагают отдельно расположенный небольшой отрог хр. Абсарока. Это плотные темно-серые мелкозернистые породы, также сложенные преимущественно идиоморфным зональным плагиоклазом (не менее 50%) и темноцветными минералами (35–40%), среди которых преобладает биотит магматической кристаллизации. На месте второго темноцветного минерала (считанные единицы в шлифе), по форме кристаллов ближе всего напоминающего пироксен, наблюдаются скопления хлорита. Такие же хлоритовые агрегаты местами замещают ядра зонального плагиоклаза. В интерстициях описанных минералов (10–15%) – мелкозернистый кварц. Рудный минерал также присутствует в количестве не менее 5%.

Как видно из табл. 1–2, описанные породы имеют довольно схожую петрохимию и характеризуются несколько повышенными содержаниями щелочей, не позволяющими, однако, отнести их к субщелочным породам, а явное преобладание Na над K похоронило наши надежды привезти из Йеллоустона образцы пород шошонит-абсарокитового ряда. Тем не менее, эти породы имеют явные отличия от

охарактеризованных ранее контрастных вулканидов. Эти отличия наилучшим образом проступают на диаграмме распределения РЗЭ, и выражаются в отчетливо выраженном преобладании лантаноидов над тяжелыми редкими землями:  $(La/Lu)_n > 50$  (табл. 2, рис. 1).

Очень характерной и отличной от других пород Йеллоустона является кривая распределения микроэлементов нормированных по MORB. Они образуют практически сливающуюся ломанную линию и, в отличие от вышеописанных вулканидов, обладают повышенным содержанием Sr и пониженным – Nb.

Конечно, наши отрывочные наблюдения не позволяют сделать каких-либо серьезных петрологических заключений, однако можно предположить, что породы хр. Абсарока, выходящего за пределы Йеллоустонского парка, довольно определенно отличаются от большинства слагающих его вулканидов и являются более поздними образованиями. По-видимому, калиевые субщелочные породы, прославившие этот район среди петрологов мира, формировались на заключительных этапах вулканической деятельности к югу и востоку от главного вулканического поля.

*Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта УрО–СО РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Классификация и номенклатура магматических горных пород. М.: Недра, 1981. 160 с.
2. Петрографический кодекс. Магматические и метаморфические образования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1995. 126 с.
3. *Bevins R.E., Kokelaar B.P., Dunkley P.N.* Petrology and geochemistry of lower to middle Ordovician igneous rocks in Wales: a volcanic arc to marginal basin transition // *Proc. Geol. Ass.* 1984. V. 95. P. 337–347.
4. *Sun S.-s., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes // *Magmatism in the Oceanic Basins / A.D. Saunders and M.J. Norry (Eds.).* Blackwell, Oxford, 1989. P. 313–345.