

Геохимия растворов и газов гидротермальных систем континентальных рифтовых зон: Солтон Си и Серро Прието, Калифорния (США и Мексика)

Taran Y.A.¹, Inguaggiato S.²

Geochemistry of solutions and gases of hydrothermal systems of the continental rift zones: Salton Sea and Cerro Prieto, California (USA and Mexico)

Taran Y.A., Inguaggiato S.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; email: taran@kscnet.ru*

² *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Palermo, Italy*

Кратко обсуждаются геохимические данные о гидротермальных системах рифтовой зоны Сан Андреас в Калифорнии: Солтон Си и Серро Прието. Показано, что рабочие скважины Серро Прието выносят в атмосферу около 880 тонн/сутки CO₂ и 69 тонн/сутки H₂S. Данные о Серро Прието сравниваются с данными других авторов.

Введение

Как известно, сухопутное продолжение Калифорнийского залива на север одновременно является продолжением рифтовой зоны Восточного Тихоокеанского поднятия (ВТП), которая на суше проявляется в виде активных разломов Солтон Трог, Серро Прието, Империял и Сан Андреас. Здесь известны уникальные высокотемпературные (>300 °C) гидротермальные системы с резервуарами в осадочных породах и высоко минерализованными флюидами: Солтон Си (Salton Sea) и Серро Прието (Cerro Prieto) на суше и Бассейн Гуаймас на дне Калифорнийского залива. В этом сообщении сделан краткий обзор геологических и геохимических особенностей геотермальных систем Солтон Си и Серро Прието. Проведено сравнение данных авторов о системе Серро Прието с данными других авторов, оценен вынос скважинами CO₂ и H₂S в атмосферу, а также высказаны некоторые соображения по поводу использования термальных рассолов в качестве промышленного источника редких металлов.

Геология и геотермия

Солтон Си на севере и Серро Прието на юге долины Империял (Imperial Valley) – геотермальные системы, расположенные в полупустынных районах. Скважины вскрывают термальную воду с температурой выше 300 °C на значительной глубине, от 2 км и глубже, причем эта вода является смесью захороненной воды реки Колорадо и древней (формационной) воды, насыщенной солями эвапоритов, в мощной толще осадков, скопившихся в устье реки Колорадо за последние около 150 тыс. лет [6, 8, 10]. По поводу источников тепла дебаты идут до настоящего времени. Для Серро Прието считается, что это достаточно глубоко расположенные дайки и силлы активной магматической системы, которая на поверхности проявляется в виде небольшого дацитового конуса Серро Прието, возраст которого около 80 тыс. лет [5]. В районе Солтон Си также есть несколько небольших (риолитовых) вулканических построек (экструзий?), включая обсидиановые образования. Одна из моделей разреза [3 и ссылки в ней] предполагает здесь подплавление гранитного слоя средней коры под действием базальтовых интрузий. Оба термальных поля имеют слабые паровые выходы, а в районе Солтон Си есть активные грязевые вулканы.

Солтон Си

Геотермальный район Солтон Си уникальный в своем роде. 28 скважин (2020 г.) глубиной больше 2 км обеспечивают работой 13 ГеоТЭС общей мощностью примерно 440 МВт [3]. Около 40 скважин закачивают использованный теплоноситель обратно в резервуар. В проекте (на 2025 г.) еще одна станция мощностью 140 МВт. Поскольку станции и скважины принадлежат частным компаниям, опубликованных данных о

составе растворов очень мало. Фактически, это две работы [6, 10]. Геотермальные запасы всей системы оцениваются примерно величиной 2900 МВт [7], т.е. это один из крупнейших, если не самый крупный, геотермальный район мира. Теплоноситель – это рассол Na-Ca-K-Cl с соленостью около 250 г/л (таблица), вода которого имеет δD примерно -80 ‰ – столько же, сколько вода реки Колорадо; аллювиальные осадки этой реки и составляют основной разрез первых километров системы. При этом дождевая вода в этом районе имеет δD в среднем около -40 ‰.

Таблица. Средний состав рассолов Солтон Си, растворов Серро Прието и рассола трубки Удачная, Якутия (г/л)

	pH	t, °C	Li	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	Br	δD	$\delta^{18}O$	M	Лит.
Солтон Си	5.1	330	0.20	53	18	28	0.04	157	0.12	0.11	-80	2.3	257	[10]
Серро Прието	7.2	300	0.02	5.0	1.2	0.3	0.1	9.4	0.01	0.03	-83	1.2	16.1	*
Удачная	4.6		0.22	20.4	17.7	88.9	17.1	247	0.05	5.2	-73	-8.2	396	[1]

Примечание: * – эта работа.

Система Солтон Си в последние 10 лет стала объектом повышенного интереса в связи с проблемой добычи лития. Рассол Солтон Си содержит более 200 мг/л лития, т.е. твердый осадок этого рассола имеет около 1 кг Li на тонну. Какие-то компании запатентовали технологический метод извлечения лития непосредственно из рассола, и поэтому на некоторых разбуренных участках рассол, прежде чем быть закачанным обратно в пласт, проходит процедуру извлечения лития [4].

К этому можно добавить, что холодные рассолы Сибири, в частности, Якутии (в том числе, связанные с алмазоносными структурами), также содержат до 200 мг/л лития при солености до 400 г/л [1, 2]. Типичный состав показан в таблице. Скорее всего, и в России кто-то уже озабочен проблемой извлечения этих рассолов из-под земли и лития из рассолов.

Серро Прието

Во время выполнения работ (2012-2013 гг.) на Серро Прието (СП) 149 скважин глубиной до 3.5 км с температурой на глубине выше 300 °C обеспечивали работой 4 блока геотермальных электростанций общей мощностью около 570 МВт. Разбуренный участок (примерно 20 км² плюс ~15 км² водоема для слива отработанной воды) и ГеоТЭС принадлежат государству (Федеральная Комиссия по электричеству, CFE), поэтому опубликованных данных об этой системе очень много. В 70-х и начале 80-х гг. даже регулярно собирался международный симпозиум по Серро Прието. Основной задачей нашего договора с CFE было оценить выбросы CO₂ и H₂S в атмосферу скважинами Серро Прието. Мы также подробно изучили химический и изотопный состав геотермальных газов СП, в том числе углеводородов до C₆, включая изотопы углерода и водорода метана и молекулярного водорода. В газах всех опробованных скважинах был измерен изотопный состав гелия. Кроме того, был проанализирован микрокомпонентный состав растворов. Результаты этой работы докладываются впервые.

Растворы СП примерно в 10 раз менее минерализованы, чем рассолы Солтон Си, но при этом имеют примерно тот же изотопный состав воды (δD ~-80 ‰, река Колорадо). Интересно также, что отношение Cl/Br в воде СП почти равно отношению в морской воде, в то время как в рассолах Солтон Си оно существенно выше.

Газовый состав флюидов СП изучался многими авторами еще в 80-е годы (напр., [8 и ссылки в ней]). Тем не менее, нам удалось получить новые и неожиданные результаты по изотопному составу метана и углеводородов для большого числа

скважин. Разброс $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ оказался от -55‰ до -25‰ , т.е. от биогенного до термогенного. При этом термогенный метан оказывается в основном в высокоэнтропийном флюиде. Изотопная геотермометрия плохо работает для пары ($\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$, $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$), но в среднем показывает температуры, близкие к 300 °C , для изотопных пар ($\delta\text{D}\text{-H}_2$, $\delta\text{D}\text{-H}_2\text{O}$) и ($\delta\text{D}\text{-CH}_4$, $\delta\text{D}\text{-H}_2\text{O}$).

Нам также удалось проанализировать изотопный состав гелия во всех 46 опробованных скважинах. Позднее, авторы работы [9] представили данные более чем для 40 скважинных флюидов СП. Интервал значений, полученный нами и во всех опубликованных работах, примерно одинаковый. Скорректированные с учетом примеси воздуха изотопные отношения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ не превышают 7Ra ($\text{Ra} = 1.39 \cdot 10^{-6}$, отношение для атмосферного гелия). Однако распределение точек на графике смещения R/Ra от ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ в работе [9] и полученное нами значительно отличаются (рис. 1). В работе [9] интерпретируют разброс составов смешением «старого» воздуха, захороненного вместе с водой реки Колорадо и накопившего ${}^4\text{He}$ за счет распада урана и тория в породах резервуара. Наши данные говорят о смешении с воздухом гелия разного возраста из вмещающих пород резервуара и гелия из мантии. Причина такого несоответствия результатов пока не понятна.

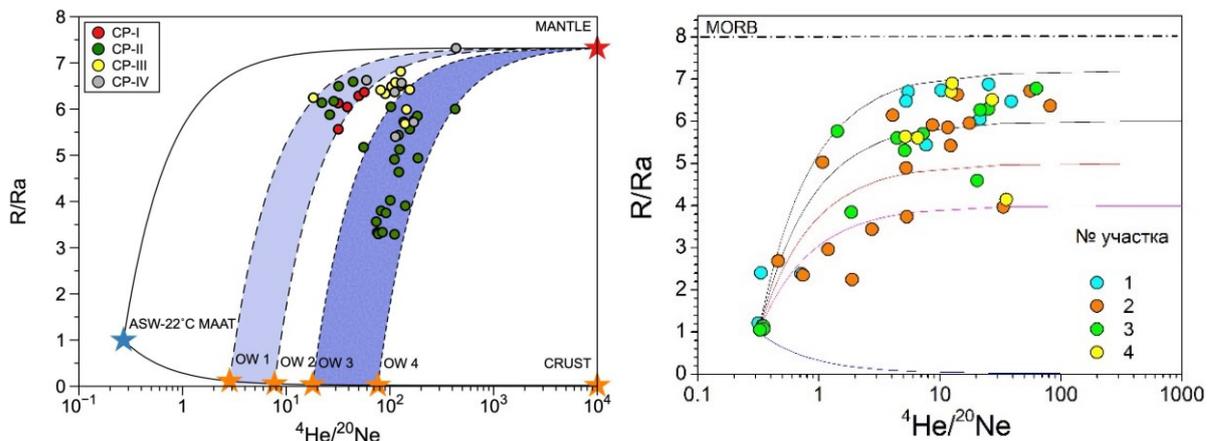


Рис. 1. Изотопный состав гелия в газах Серро Прието. Слева – данные работы [9], справа – наши данные.

Чтобы оценить общий вынос газов из работающих скважин месторождения, мы точно рассчитали этот вынос из 46 опробованных нами скважин, используя данные CFE о расходе и энтальпии теплоносителя и наши данные о газосодержании паровой фазы. Затем мы сравнили данные о расходах теплоносителя из опробованных 46 скважин и всех 149 рабочих скважин месторождения. Результаты сравнили с помощью построения гистограммы распределения расходов (рис. 2). Поскольку пропорциональность расходов была соблюдена, результаты по расходу газов (CO_2 и H_2S) для 46 скважин были умножены на 3.15, и таким образом, для общей эмиссии CO_2 и H_2S получены величины 880 и 69 тонн/сутки. Ошибки оцениваются нами примерно в 10 %, т.е. 880 ± 8.8 тонн/сутки и 69 ± 6.9 тонн/сутки.

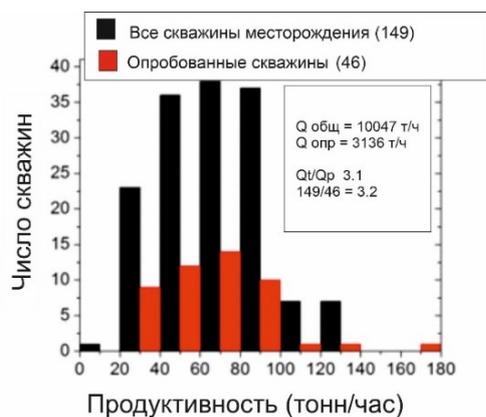


Рис. 2. Распределение расходов пароводяной смеси из скважин месторождения Серро Прието. Отношение числа опробованных скважин к общему числу рабочих скважин оказалось почти равным отношению их продуктивностей.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Борисов В.Н. и др. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы // Геология и Геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 291-304.
2. Шварцев С.Л. Химический состав и изотопы стронция рассолов Тунгусского бассейна в связи с проблемой их формирования // Геохимия. 2000. № 11. С. 1170-1184.
3. DiPippo R., Lippman M. The shrinking Salton Sea and its impact on geothermal development. GRC Bulletin. 2017. July/August. P. 28-33.
4. Dobson P., Araya N., Brounce M. et al. Characterizing the Geothermal Lithium resource at the Salton Sea. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2023. <https://escholarship.org/uc/item/4x8868mf>
5. García-Sánchez L., Macías J.L., Sosa-Ceballos G. Genesis and evolution of the Cerro Prieto Volcanic Complex, Baja California, Mexico // Bulletin of Volcanology. 2017. V. 79. Art. 44. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1126-8>
6. Helgeson H.C. Geologic and thermodynamic characteristics of the Salton Sea geothermal field, southern California // American Journal of Science. 1968. V. 66. P. 129-166.
7. Kaspereit D., Rickard W., Osborn W. et al. Updated Conceptual Model and Reserve Estimate for the Salton Sea Geothermal Field, Imperial Valley, California // Geothermal Resources Council Transactions. 2016. V 40. P. 57-66.
8. Lippman M.J.A., Truesdell A.H., Halfman-Dooley S.E. et al. A review of the hydrologic-geochemical model for Cerro-Prieto // Geothermics. 1991. V. 20. P. 39-52.
9. Pinti D.L., Castro C.M., Lopez Hernandez A. et al. Cerro Prieto geothermal field (Baja California, Mexico) – A fossil system? Insights from a noble gas study // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. V. 371. P. 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.12.010>
10. Williams A.E., McKibben M.A. A brine interface in the Salton Sea geothermal system, California. Fluid geochemical and isotopic characteristics // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1983. V. 53. P. 1905-1920.