

С. Н. Кох¹, Э. В. Сокол¹, Е. В. Деев^{2,3}, Ю. М. Ряполова^{2,3}

¹ – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск
s.n.kokh@gmail.com*

² – *Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

³ – *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*

Травертины Горного Алтая: источники вещества, климатические и тектонические обстановки формирования

Формирование кайнозойского внутриконтинентального Алтайского орогена (49–52° с.ш., 82–90° в.д.) связано с отдаленными эффектами коллизии Индийской и Евразийской плит. Резко усилившиеся деформации коры в четвертичном периоде привели к образованию горных хребтов с абсолютными высотами до 3–4 тыс. м и крупных межгорных впадин в юго-восточной части Алтая. Горный Алтай расположен в зоне взаимного влияния Атлантического циклона и Сибирского и Монгольского антициклонов. Поэтому в сартанское время и в течение голоцена климатические обстановки данной горной страны были особенно чувствительны к сменам динамики циркуляции атмосферы [Blyukharchuk et al., 2004]. Четвертичная история Алтая включает три плейстоценовых оледенения, сменявшихся периодами деградации ледников и вечной мерзлоты [Девяткин, 1965]. Одним из признанных индикаторов активной тектоники и климатических изменений являются пресноводные континентальные карбонатные осадки – пещерные, озерные и травертины [Andrews, 2006]. На объектах Европы было показано, что климатические сигналы, зафиксированные в травертинах возрастом до 500 тыс. лет, однозначно интерпретируются, поскольку рост CaCO₃ из растворов был возможен только в периоды деградации ледниковых покровов и/или таяния вечной мерзлоты. Представляется оправданным опробовать этот подход и на объектах Горного Алтая.

Ранее было установлено широкое распространение палеотравертинов в Курайской зоне разломов – одной из главных активных структур ЮВ части Горного Алтая [Деев и др., 2017]. Поля расположены в долине р. Чибитка на высотах 1800–2000 м и приурочены к зоне пересечения Курайского и Телецкого разломов. Палеотравертины сложены кальцитом и цементируют сероцветный коллювий и моренные отложения, оставленные Чибитским ледником на рубеже раннего голоцена. Отсутствие признаков химического выветривания, глинистых фракций и неполное окисление сульфидов позволяют классифицировать коллювий как продукт физического выветривания в холодном климате. Единственная датировка (¹⁴C) травертинов этого комплекса составляет 9520±105 лет (SOAN-3129) или 11180–10565 cal BP [Бутвиловский, 1993].

Современное травертинообразование ограничено и происходит из малодебетного источника, изливающего холодные (10 °С) воды HCO₃-SO₄-Ca-Mg типа (pH 6.86). Величина δ¹³C растворенного в воде CO₂ составляет –5.8 ‰ (VPDB), а величина δ¹⁸O – –14.5 ‰ (VSMOW). Обогащение вод Ca, Mg и HCO₃ (при ничтожной доле Na и Cl) указывает на формирование их солевого состава в процессе подземного углекислого выщелачивания карбонатных толщ [Лаврушин, 2012]. В данном районе это региональные коллекторы – дислоцированные известняки и доломиты баратальской серии (NP₃).

Изученные палеотравертины однотипны и представляют собой кальцитовый микритовый и спаритовый матрикс, поры в котором выполнены ограненным кальцитом. Подобие фазового состава и морфологии разновозрастных травертинов свидетельствует о том, что температура и гидрохимические характеристики источников и, следовательно, условия кристаллизации CaCO_3 варьировали незначительно. Приуроченность травертинов к склоновым и моренным осадкам указывает на то, что в ходе формирования современного рельефа в крутых бортах долин разгрузка поступающих снизу углекислых вод происходила именно в эти проницаемые горизонты. В толще коллювия и моренных отложений сглаживались суточные колебания температуры, а также минимизировалось влияние фактора испарения на процесс садки карбонатов и изотопное фракционирование. Фотосинтез в этой обстановке был подавлен, что было важным фактором, сдерживающим рост микробных сообществ. Как следствие, из гидрокарбонатных растворов происходила кристаллизация только одной из модификаций CaCO_3 , а именно кальцита. Процесс контролировался концентрациями Ca^{2+} и HCO_3^- в растворе: $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3\downarrow + \text{CO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$.

В начале 1980-х гг. травертиновый комплекс, расположенный в долине р. Чибитки, был вскрыт дорожной выработкой, и травертиновый источник стал разгружаться непосредственно на дневной поверхности. Это вызвало вспышку активности водных микробиоценозов и резкую смену условий карбонатообразования, что привело к изменению морфологии и фазового состава травертинов. На выходе современного источника образуются слоистые корки, состоящие из микритового и спаритового Mg-кальцита и Sr-арагонита, покрытых водорослями и биопленками. Биодegradация внеклеточного полимерного вещества микробных пленок приводит к высвобождению связанных в нем Ca^{+2} , Mg^{+2} и (HCO_3^-) и их переходу в раствор [Durgaz et al., 2004]. Процесс сульфат-редукции, повышая pH, способствует кристаллизации CaCO_3 и замещению микробного вещества микритовым Mg-кальцитом. Агрегаты такой природы обладают характерной зональностью – количество высокомагниевого кальцита максимально в верхних слоях литифицированных бактериальных матов. Именно эта особенность характерна для современных травертинов из района р. Чибитки. Следовательно, в момент образования палеотравертинов микробная активность была подавлена, тогда как биогенная садка карбонатов вносит важный вклад в современное травертинообразование.

Современные и древние травертины обеднены РЗЭ (Σ 0.40–16.4 и 0.40–3.80 г/т, соответственно). Их PAAS-нормированные РЗЭ+У спектры сходны и характеризуются незначительным обогащением тяжелыми и обеднением легкими РЗЭ. Эти особенности распределения РЗЭ, низкие содержания в травертинах Th (0.03–0.06 г/т) и величина K/Rb (среднее 301), близкая таковой морских карбонатов (304), согласованно указывают на длительный контакт холодных вод, из которых осуществлялся рост как палео- так и современных травертинов, с карбонатными коллекторами [Choi et al., 2009].

Положительные величины $\delta^{13}\text{C}$ (0.1–0.9 ‰, VPDB) зафиксированы только в современных травертинах, тогда как палеотравертины характеризуются более легким $\delta^{13}\text{C}$ (–4.1...–1.9 ‰, VPDB). Изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ разновозрастных травертинов (–13.0...–13.8 ‰, VPDB) выдержанный. Хотя данных по травертинам Горного Алтая еще мало, можно попытаться рассмотреть их изотопные особенности с позиций соответствия общему тренду облегчения изотопного состава $\delta^{18}\text{O}$ с ростом континентальности климата [Andrews, 2006]. Для интервала 8500–9500 тыс. лет состав $\delta^{18}\text{O}$

травертинов изменяется от –6 ‰ в Англии и Бельгии до –11 ‰ в Белоруссии. Таким образом, узкий диапазон величин $\delta^{18}\text{O}$ травертинов Горного Алтая логично продолжает тренд облегчения изотопного состава кислорода CaCO_3 по мере удаления от Атлантического побережья. Именно на рубеже 9.5 тыс. лет назад на Алтае на смену преобладавшему ранее холодному и сухому Сибирскому антициклону приходят влажные, теплые воздушные массы Атлантического циклона [Blyakharchuk et al., 2004].

Детальные палеоклиматические реконструкции были выполнены для высокогорного Улаганского плато – смежного с изученным районом [Blyakharchuk et al., 2004]. В интервале 15.9–15 тыс. лет назад плато было покрыто ледником. В интервале 15–12 тыс. лет назад ледники последовательно таяли, однако площади развития вечной мерзлоты еще были значительными. Отчетливое потепление фиксируется в этом районе около 11.5 тыс. лет назад, а климатический оптимум – начиная с 10 тыс. лет. Поскольку палеотравертины цементируют моренный материал, их возраст заведомо моложе 15 тыс. лет. Подъем вод из коллекторов на поверхность стал возможен только с момента деградации в этом районе мощной толщи вечной мерзлоты. Следовательно, на периферии Чибитского ледника фильтрация подземных вод в моренные осадки и коллювий могла начаться только с рубежа 11.5 тыс. лет, когда процесс деградации вечной мерзлоты на юге Западной Сибири был близок к завершению [Blyakharchuk et al., 2004]. Таким образом, геологические критерии не оставляют сомнения в том, что травертины в верховьях р. Чибитки образовались после последнего эпизода оледенения, что подтверждает имеющаяся радиоуглеродная датировка [Бутвиловский, 1993].

В голоцене снятие ледниковой нагрузки на континентах привело к общему росту сейсмичности в Скандинавии, Тибете, на севере Русской равнины [Hampe et al., 2010]. Деградация мерзлоты и землетрясения способствовали интенсификации трещиноватости [Неведрова и др., 2017]. В голоценовом оптимуме на территории Горного Алтая имели место сходные процессы. На этапе деградации ледниковой нагрузки активизация Курайской зоны разломов также сопровождалась ростом сейсмичности. На это указывают первичные сейсморазрывы и крупные обвалы в интервале 12–8.5 тыс. лет назад [Бутвиловский, 1993]. Эти данные позволяют предполагать, что время и место образования травертинов Горного Алтая контролировали тектонический и климатический факторы.

Таким образом, полученные нами данные позволяют впервые поставить вопрос о возможности извлечения палеоклиматической информации из травертинов Горного Алтая. Их достаточно широкое распространение в регионе [Деев и др., 2017] дает основание рассчитывать на них в качестве новых независимых тектонических и климатических индикаторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0330-2016-0004. Минералого-геохимические, изотопные и гидрогеохимические исследования и интерпретация результатов выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-6322.2016.5. Анализ геологической позиции объектов поддержан грантом РФФИ № 16-35-00415 мол_а.

Литература

Бутвиловский В. В. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: ТГУ, 1993. 252 с.

- Десяткин Е. В. Кайнозойские отложения и неотектоника юго-восточного Алтая. М.: Наука, 1965. 244 с.
- Деев Е. В., Сокол Э. В., Ряполова Ю. М., и др. Четвертичные травертины Курайской зоны разломов (Горный Алтай) // Доклады академии наук. 2017. Т. 73. № 1. С. 54–59.
- Лаверушин В. Ю. Подземные флюиды большого Кавказа и его обрамления. М.: ГЕОС, 2012. 348 с.
- Неведрова Н. Н., Деев Е. В., Пономарев П. Н. Выявление разломных структур и их геоэлектрических характеристик по данным метода сопротивлений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. // Геология и геофизика. 2017. № 1. С. 146–156.
- Andrews J. E. Palaeoclimatic records from stable isotopes in riverine tufas: Synthesis and review // Earth-Science Reviews. 2006. Vol. 75. P. 85–104.
- Blyakharчук Т. А., Wright H. E., Borodavko P. S., et al. Late-glacial and Holocene vegetational changes on the Ulagan high-mountain plateau, Altai Mountains, southern Siberia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2004. Vol. 209. P. 259–279.
- Choi H. S., Yun S. T., Koh Y. K., et al. Geochemical behavior of rare earth elements during the evolution of CO₂-rich groundwater: A study from the Kangwon district, South Korea // Chemical Geology. 2009. Vol. 262 (3–4). P. 334–343.
- Dupraz C., Visscher P. T., Baumgartner L. K. et al. Microbe–mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas) // Sedimentology. 2004. Vol. 51. P. 745–765.
- Hampel A., Hetzel R., Maniatis G. Response of faults to climate-driven changes in ice and water volumes on Earth's surface // Philosophical Transactions Royal Society A. 2010. Vol. 368. P. 2501–2517.

А. В. Малышев, Е. В. Кислов^{1,2}

¹ – Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ

² – Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ
Waylander6@mail.ru

Петролого-геохимические аспекты Холбын-Хаирханского гипербазитового плутона (Восточный Саян)

В Восточном Саяне широко распространены гипербазитовые офиолитовые комплексы, которые в процессе становления испытали частичное плавление и были тектонически подняты на дневную поверхность. Состав гипербазитов и слагающих их минералов определяется исходным составом океанической верхней мантии, степенью ее плавления, а также процессами метаморфизма при транспортировке ее к верхней коре или на дневную поверхность. Гипербазиты офиолитовых комплексов представляют интерес как в изучении состава породообразующих элементов, которые претерпевали изменения в процессе подъема, так и с практической точки зрения, в связи с месторождениями полезных ископаемых, одними из таковых являются месторождения нефритов. Объектом нашего исследования стал Холбын-Хаирханский массив, расположенный в пределах юго-восточной высокогорной части Восточного Саяна в бассейне верхнего течения р. Урик. Массив имеет грушевидную форму, максимальную ширину 5.5 км, длину 12.2 км и площадь ~25 км².