

ТРАВЕРТИНЫ — каменная летопись землетрясений ГОРНОГО АЛТАЯ

Е. В. ДЕЕВ, С. Н. КОХ, Э. В. СОКОЛ



Древний травертиновый комплекс. Горный Алтай

Ключевые слова: травертины, сейсмическая активность, активные разломы, палеоземлетрясения, Горный Алтай, ^{230}Th -U-датирование.

Key words: travertine, seismic activity, large active fault, paleoearthquake, Gorny Altai, ^{230}Th -U dating



Травертины Памуккале формируются из воды одного источника с расходом воды в 466 л/с и температурой 35,6 °С. Вода спускается по склону с высоты 60–70 м, постепенно осаждая карбонат кальция в виде мягкого геля

У тех, кто побывал на термических источниках Памуккале в турецкой провинции Денизли, при слове «травертины» всплывает в памяти образ впечатляющего каскада белоснежных карбонатных террас-бассейнов с голубой теплой водой среди причудливых минеральных натеков. Это чудо природы – огромное травертиновое поле – образовалось в результате излияния на поверхность обогащенных углекислотой подземных вод, движущихся вдоль активного разлома. Путешествуя по Горному Алтаю, вы, скорее всего, не обратили бы никакого внимания на травертиновые комплексы, хотя некоторые из них расположены прямо на популярных туристических маршрутах. Бежевые и серо-коричневые натёки алтайских травертинов внешне уступают эффектным террасам Памуккале. Но это тот случай, когда не стоит «встречать по одежке», ведь главная особенность травертинов – способность наследовать и сохранять индикаторные изотопно-геохимические характеристики материнских растворов – не зависит от облика. И если их «разговорить», они способны многое рассказать о недавней геологической истории Алтая, как и травертины Турции – об истории Малой Азии



Травертины поля Тотугем. Горный Алтай



ДЕЕВ Евгений Викторович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики и палеомагнетизма Института нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск), профессор кафедры общей и региональной геологии геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета. Автор и соавтор 290 научных работ



КОХ Светлана Николаевна – доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории метаморфизма и метасоматоза Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 62 научных работ



СОКОЛ Эллина Владимировна – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории метаморфизма и метасоматоза Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 142 научных работ

© Е. В. Деев, С. Н. Кох, Э. В. Сокол, 2025

Термин «травертин» имеет французское происхождение, его латинский аналог – *lapis tiburtinus*, или *тибуртинский камень*. Тибуром во времена Римской империи называлась деревня Тиволи недалеко от Рима, где этот камень добывали для строительства. Именно травертин из Тиволи был одним из основных строительных материалов при сооружении Колизея (Pentecost, 2005). Помимо Италии, травертин долгое время использовался как строительный и облицовочный камень в Армении, Китае, России, США и Турции. Последняя, наряду с Италией, является настоящей меккой для исследователей этой породы.

Первые природные травертиновые комплексы, попавшие в поле



Белые террасы Паммукале – природные травертиновые образования, связанные с горячими источниками. Турция. Фото А. Савина. Free Art License

Одна из подсвеченных травертиновых мозаик в стиле оп-арт работы В. Фангора в зале ожидания железнодорожной станции «Варшава-Средместье» (Польша). 1963 г. Public Domain



В античном городе Иераполисе, расположенном к северу от Памуккале, травертины использовались при строительстве и облицовке общественных сооружений и гробниц. Город неоднократно подвергался разрушениям при землетрясениях и окончательно пришел в упадок после мощнейшего Фракийского землетрясения 1354 г. Иераполис и источники Памуккале признаны природным и культурным объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО

зрения ученых еще в XIX–XX вв., располагались в районах современной вулканической и (или) тектонической активности. Однако осознание того, что в палеосистемах они занимали аналогичную нишу, пришло совсем недавно и стимулировало резкий всплеск исследовательского интереса к этим объектам как индикаторам палеотектонических, палеогеографических событий и палеогеологических обстановок.

Палеотравертины – это своего рода «вещественные свидетельства», сохранившиеся на месте некогда существовавших источников и их подводящих каналов. Часто они непосредственно фиксируют места, где находились зоны разломов, через которые минерализованные флюиды поступали на земную поверхность. При этом слагающие травертины карбонатные минералы способны сохранять изотопно-геохимические характеристики своих «генетических предшественников» и вследствие этого обладают исключительно высокой информативностью в качестве их индикаторов.

На рубеже XXI в. методология исследования травертинов и реконструкции процессов и условий их образования претерпела принципиальные изменения. Произошел переход от описательных подходов к комплексным, когда основное внимание начали уделять минералогическим и изотопно-геохимическим характеристикам этих пород и гидрогеохимическим параметрам вод, из которых они кристаллизовались.

Новые подходы позволили воссоздать условия возникновения огромного количества карбонатных новообразований по всему миру, происхождение которых ранее было неизвестно либо установлено неверно.

Какими они бывают?

Травертины можно классифицировать по нескольким критериям. Прежде всего, они образуют морфологически различные тела. Помимо террас, каскадов и натеков эти породы могут формировать холмы, купола и хребты, корки и покровы на склонах, в речных долинах и на дне озер. Травертины цементируют обломочный материал, а внутри геологических массивов образуют жилы и другие тела неправильной формы (Pentecost, Viles, 1994).

Помимо морфологии, в основу классификации травертинов закладываются и другие, самые разнообразные критерии: минералогические и геохимические особенности карбонатных агрегатов, условия их формирования, глубина циркуляции и температура «родительских» вод и т. д. (Pentecost, Viles, 1994; Pentecost, 2005).

Важнейшая характеристика травертинов – изотопный состав слагающих их минералов *кальцита* и *арагонита* (полиморфных модификаций *карбоната кальция*, CaCO_3). Соотношение стабильных изотопов углерода и кислорода у них может меняться по двум причинам. Во-первых, в зависимости от источника *углекислого газа* (CO_2) – атмосферного, почвенного, биологического, магматического или метаморфического, – который поступает в подземные и поверхностные воды и способствует растворению карбонатных пород. Во-вторых, сами эти минералы могут различаться по изотопным характеристикам углерода и кислорода в зависимости от своего происхождения.

Травертины – карбонатные отложения, растущие из вод обогащенных углекислотой источников. Температура воды может сильно варьировать: от умеренной (не выше 20°С) до очень горячей (90°С) (Pentecost, 2005). При выходе углекислых вод на поверхность происходит их дегазация, которая приводит к кристаллизации карбонатов, чаще всего карбоната кальция:



Такой механизм образования роднит травертины с карбонатными натеками пещер – сталактитами и сталагмитами, которые признаны важнейшими «каменными архивами» для палеоклиматических реконструкций и оценки параметров древних сейсмических событий. В последнее время к травертинам также стали относить и карбонатные образования, осаждающиеся из речных и озерных вод

Природный углерод состоит из двух стабильных изотопов: «легкого» ^{12}C и «тяжелого» ^{13}C (около 98,9 и 1,1% соответственно). Его изотопный состав выражается соотношением $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, при этом стандартом служит углерод раковины ископаемого моллюска мелового периода, хранящийся в Вене. В случае изотопно-тяжелого состава углерода карбонатный минерал обогащен изотопом ^{13}C

В результате образующаяся в воде углекислота наследует изотопный состав как углекислого газа, так и растворимых карбонатных пород. В свою очередь, этот изотопный состав получают травертины, отлагающиеся из обогащенных CO_2 вод.

На основе различий в изотопных характеристиках углерода и кислорода в составе кальцита и (или) арагонита травертины относят к *метеогенной* или *термогенной* группам (Pentecost, Viles, 1994; Teboul et al., 2016).

Источником углекислого газа для метеогенных травертинов являются почвы, и в этом случае речь идет о «легком изотопном» составе углерода карбонатов. Такие травертины особенно важны для палеоклиматических реконструкций. Вариации состава стабильных изотопов кислорода и углерода можно увязать с различными факторами внешней среды, такими как температура подземных вод, испарение в засушливые периоды, приток дождевых вод, деятельность микроорганизмов (Pentecost, 2005).

В образовании термогенных травертинов (с «изотопно тяжелым» составом углерода) задействованы глубинные источники углекислого газа. Такие породы формируются во многих современных тектонически активных областях (Северный Кавказ, Крым, Камчатка, Тибет, Апеннины, Эгейско-Анатолийский регион, североамериканское Йеллоустонское плато, Восточно-Африканская рифтовая система, Япония).

В большинстве случаев CO_2 , который участвует в формировании термогенных травертинов, выделяется в ходе средне- и высокотемпературных процессов в земной коре или в верхах мантии. Этими процессами могут выступать реакция декарбонизации морских известняков при метаморфизме или дегазации магматических расплавов.

Углекислый газ термогенной природы растворяется, часто под действием высокого давления, в подземных водах различного происхождения и температуры. Высокая концентрация CO_2 в воде способствует растворению больших объемов карбонатных пород, что, в свою очередь, утяжеляет изотопный состав углекислоты.

Однако часто воды, из которых осаждаются травертины, имеют смешанное происхождение. Например, атмосферные воды могут проникать по разломам на глубину, а глубинные флюиды разной природы –



Алтайские травертины представляют собой мелкокристаллическую породу, сформированную минералами карбоната кальция (кальцитом и его полиморфной модификацией – арагонитом). Исследования с помощью оптической, электронной и сканирующей микроскопии показали, что кальцит травертинов образует в полостях между обломками разрушенных коренных пород различные по морфологии агрегаты из кристаллов размером до 1 мм. Арагонит присутствует в виде отдельных кристаллов или сферолитоподобных агрегатов, нарастая на поверхность кальцита. Оба минерала часто формируют ониксоподобные агрегаты, представляющие собой чередование тонких (до 150 мкм) полос, сложенных коричневым кальцитом и бесцветным арагонитом

Шлиф радиально-лучистого арагонита в поляризованном проходящем свете при разном освещении. Травертиновый комплекс Красные ворота (Горный Алтай)

Шлиф кальцит-арагонитового агрегата. Травертиновый комплекс Чейбеккель-2 (Горный Алтай). Оптическая микроскопия

Кальцит
Арагонит

2 мм



подниматься по ним к поверхности. Поэтому при исследовании травертинов и углекислых вод очень важно установить источник углекислого газа.

Травертины + тектоника = травитоника

Последние исследования термогенных травертинов, образовавшихся в *четвертичный период* (т.е. за последние 2,6 млн лет) в сейсмически активных регионах мира, показали наличие тесной связи между активными разломами, сейсмичностью и циркулирующей травертинообразующих вод.

Были сделаны успешные попытки использовать такие травертины для определения возрастов и периода повторяемости древних землетрясений, оценок скоростей и величин смещений блоков земной коры вдоль разломов. На сегодняшний день реконструкция палеосейсмических событий на базе характеристик травертинов является одним из молодых и активно развивающихся направлений в сеймотектонике и палеосейсмологии.

В современном рельефе Горного Алтая, для которого характерно постоянное (ежесезонное) обновление, древние травертиновые комплексы чаще всего сохраняются в виде крупных останцев благодаря своей устойчивости к выветриванию. Некоторые из них приобретают весьма живописные формы, которые могут напоминать, к примеру, сфинкса (*справа*) или белую лягушку (*вверху*).

В рамках этой концепции появился даже неологизм *травитоника (travitonic)*, который подчеркивает взаимосвязь между формированием травертинов и разломообразованием, сопровождаемым сейсмичностью (Hancock *et al.*, 1999).

Сейчас в мировом научном сообществе все активнее используется новый подход к определению возрастов палеоземлетрясений – с помощью *уран-ториевого датирования* на основе соотношения концентраций двух радиоактивных изотопов: ^{230}Th и ^{234}U . Этим методом можно устанавливать возраст осадочных карбонатных отложений в диапазоне до 500 тыс. лет.

В Горном Алтае травертины эпизодически описывались геологами начиная с 1930-х гг. Они были обнаружены в Юго-Восточном и Центральном Алтае, в зонах сочленения Чуйской, Курайской и Уймонской межгорных впадин с обрамляющими их горными хребтами, а также в долине р. Бия и на Телецком озере (Русанов и др., 2013; Kokh *et al.*, 2017; Deev *et al.*, 2023a, b; 2024).

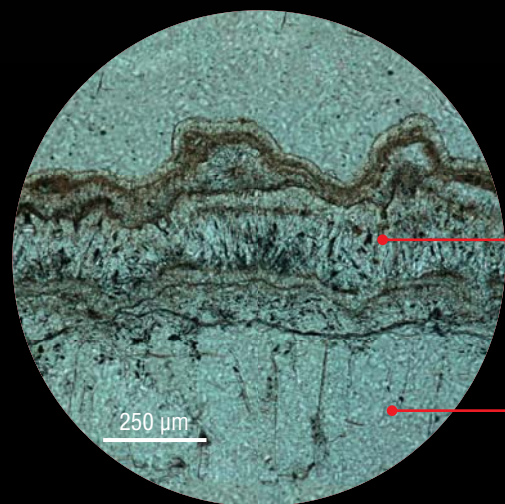
При этом все исследователи были единодушны, отмечая приуроченность большинства их скоплений к выраженным в рельефе разломам. Так что изучение этих пород может существенно расширить и детализировать сейсмическую летопись этого региона, в которой имеется немало белых пятен.

Алтайские фонтаны и грифоны

Считается, что в своем современном виде Горный Алтай возник как отдаленный «отголосок» столкновения Индостана и Евразии, случившегося примерно 65–60 млн лет назад. Рост горных хребтов Горного Алтая особенно усилился в последние 2,6 млн лет. Сейчас алтайские горы с северо-запада на юго-восток имеют абсолютные отметки высоты от 300–500 до 3000–4500 м.

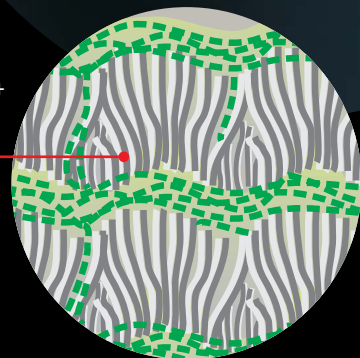
Горообразование сопровождалось землетрясениями, информацию о которых мы черпаем преимущественно из данных 60-летнего периода





Кальцит + арагонит + бактерии

Кальцит



В начале 1980-х гг. травертиновый комплекс, расположенный в Юго-Восточном Алтае на берегу оз. Чейбеккель, был вскрыт дорожной выработкой. С этого времени подземные воды травертинового источника стали изливаться непосредственно на земную поверхность. В результате на выходе источника теперь отлагаются слоистые кальцит-арагонитовые корки, в которых карбонатные прослойки разделены захороненными биопленками. В основании корок находятся более древние друзовые агрегаты кальцита. Очевидно, что ключевую роль в современном карбонатообразовании на этом комплексе играют микробные сообщества. *Поляризационная микроскопия*



Современный травертиновый источник на восточном берегу оз. Чейбеккель. Горный Алтай, 2015 г.

наблюдений с помощью региональных сейсмологических сетей. Редкие сведения об исторических землетрясениях, случившихся в регионе за предшествующие 200 лет, содержатся в сейсмологических каталогах.

На основе этих данных удалось установить, что прилегающая к Монголии юго-восточная часть Горного Алтая является одним из самых сейсмоактивных районов севера Центральной Азии. Именно здесь 27 сентября 2003 г. произошло наиболее сильное за последние полвека Чуйское (Алтайское) землетрясение с магнитудой 7,3 по шкале Рихтера и интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64, за которым последовал многолетний афтершоковый процесс из сотен сейсмических событий.

В результате землетрясения вдоль Южно-Чуйского разлома на поверхности сформировались разрывы общей протяженностью 70 км, на обширной территории Чуйской и Курайской впадин возникли многочисленные оползни и обвалы.

Землетрясение вызвало миграцию и изливание подземных вод на поверхность, где образовалась серия фонтанирующих источников, которые действовали на протяжении 1–5 ч. Напор наиболее высоких (до 5 м) фонтанов был таков, что из них с водой выносился не только песчано-глинистый, но и гравийно-галечный материал.

На поверхности земли формировались песчаные вулканы и *грифоны* (воронки), из которых изливались вода и грязь (из некоторых на протяжении 4 суток), усиливаясь или возобновляясь при афтершоках.

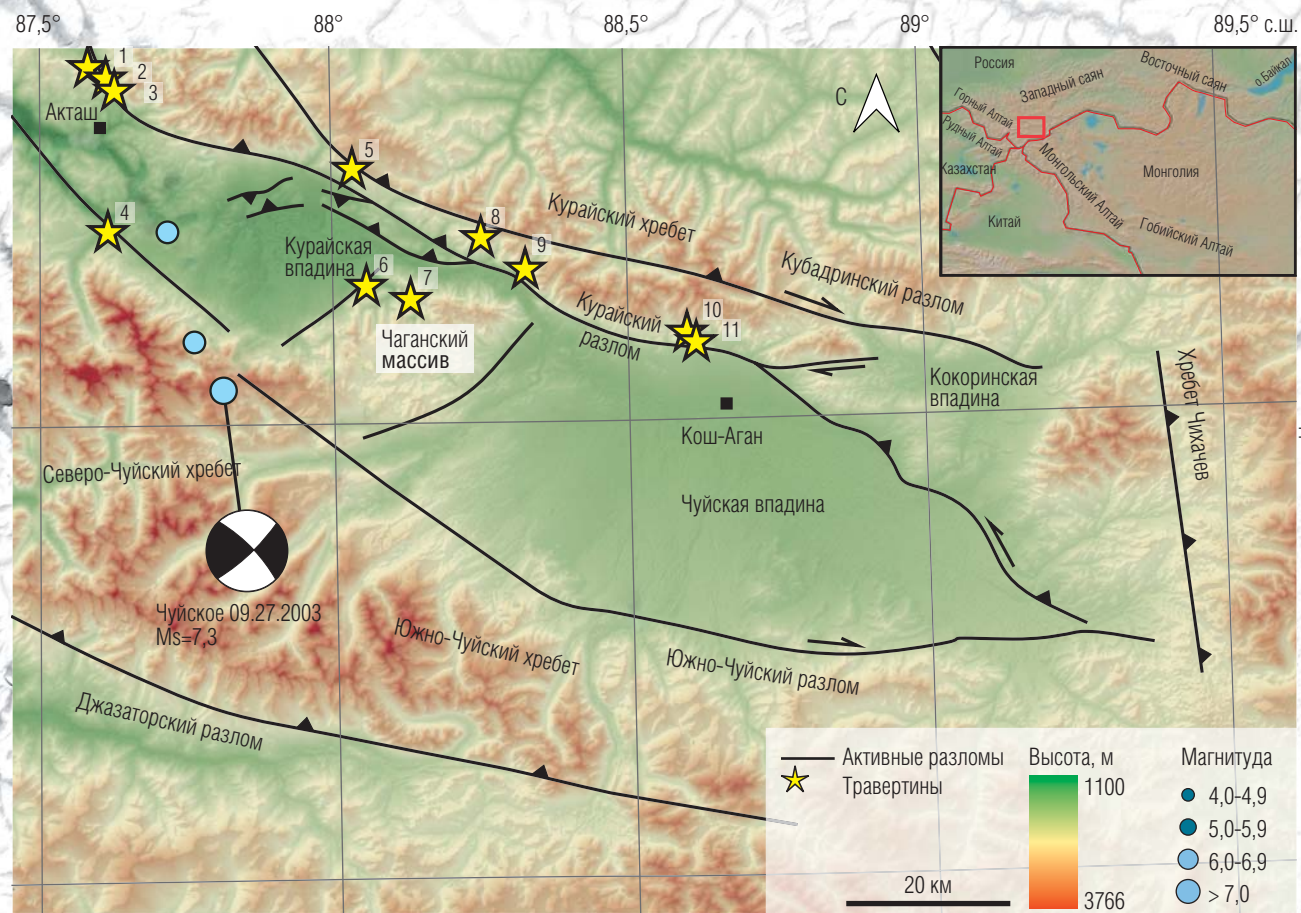
По сообщениям местных жителей, после основного толчка массы, изливавшиеся через грифоны, были теплыми. Вдоль некоторых сейсмических разрывов возникли родники с повышенной минерализацией (Доставалова, 2004).

Все эти наблюдения свидетельствуют, что в результате землетрясения на Горном Алтае складываются условия, благоприятные для образования травертинов. В первую очередь это возникновение зон трещиноватости вдоль разломов, по которым на поверхность могут поступать восходящие потоки травертинообразующих растворов.

При этом результаты палеосейсмологических исследований свидетельствуют, что в рельефе Юго-Восточного Алтая сохранились следы поверхностных разрывов, оползней и обвалов, аналогичных тем, что возникли при Чуйском землетрясении. Их изучение и датирование показало, что они появились за последние 7,5 тыс. лет в результате нескольких сильных землетрясений с магнитудами 6,5–7,6, интервалы между которыми составляли от 200 до 1,7 тыс. лет (Deev *et al.*, 2024).

«Календарь» сейсмической активности

Учитывая высокую сейсмичность юго-восточной части Горного Алтая, связанную с многочисленными активными разломами, авторы этой статьи, специалисты из Новосибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, инициировали многолетний цикл работ по углубленному изучению алтайских травертинов.



Травертины цементируют обломочный склоновый и ледниковый материал, отложения рек и временных водотоков. В результате на месте рыхлых осадков возникают горные породы – *брекчи*, *конгломераты* и *песчаники*. Такие тела, сцементированные травертинами, имеют толщину до 50 м и протяженность до 800 м (Русанов и др., 2013; Kokh *et al.*, 2017; Deev *et al.*, 2023 а, в). Объектами исследования новосибирских ученых стали 11 травертиновых тел из комплексов, приуроченных к разломам, ограничивающим Чуйскую и Курайскую впадины, которые проявляли сейсмическую активность в течение последние 10 тыс. лет.

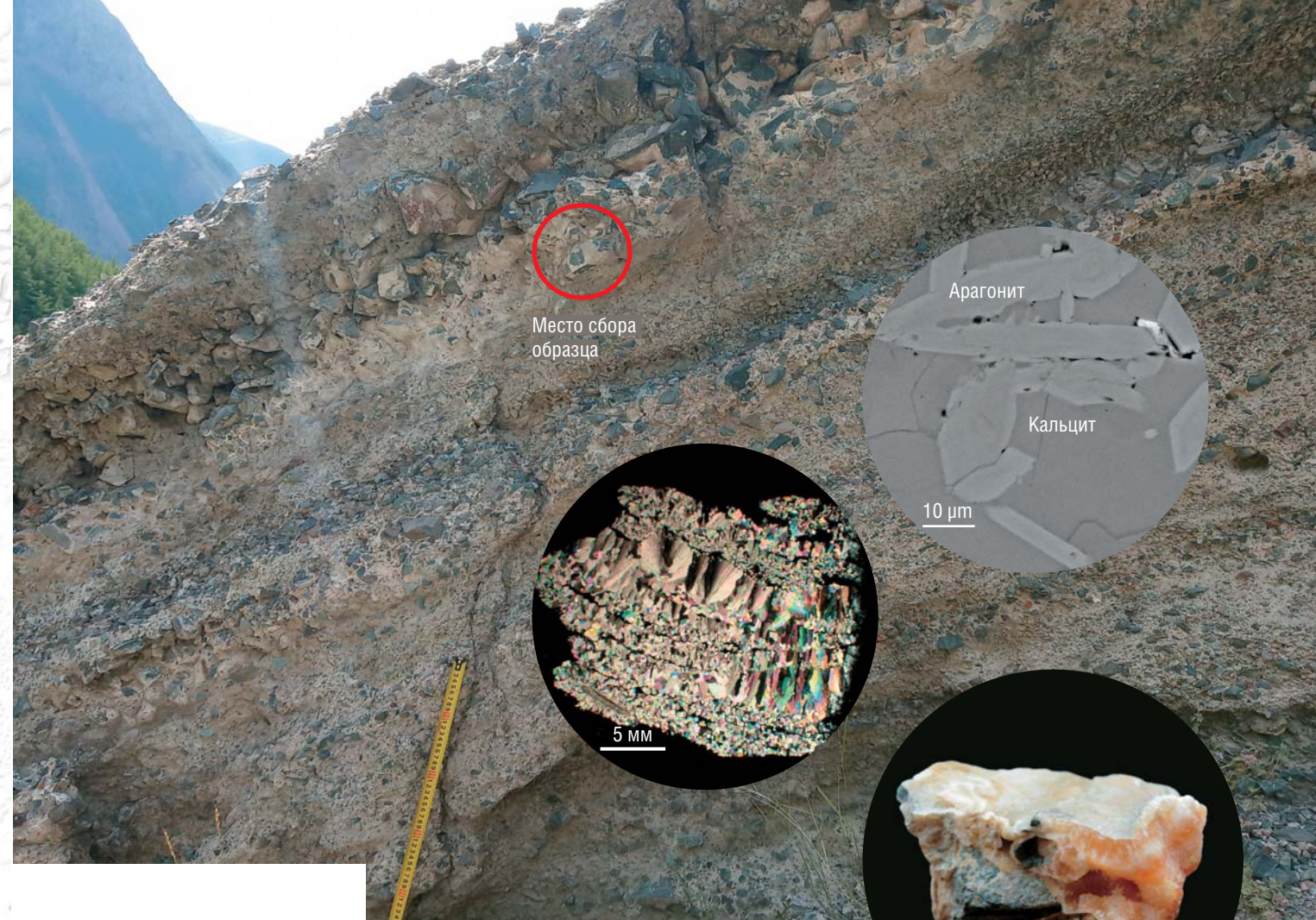
Анализ стабильных изотопов углерода и кислорода карбонатных минералов, а также соотношения *стронция и бария* (Sr/Ba) в образцах травертинов показал, что они являются термогенными и могли сформироваться из подземными вод, находившихся в длительном контакте с известняками и доломитами. Последние широко распространены среди докембрийских и палеозойских толщ в пределах Чуйской и Курайской впадин и прилегающих хребтов.

Изотопные характеристики травертинового кальцита указывают на то, что атмосферные воды изначально

на карте Юго-Восточного Алтая отмечены активные разломы, эпицентры исторических и инструментальных землетрясений и местонахождение изученных полей травертинов. Травертиновые комплексы отмечены цифрами: 1 – Чейбеккель-2; 2 – Чейбеккель-1; 3 – Чейбеккель-3; 4 – Чибит, 5 – Курайка; 6 – Балтыгран; 7 – Арыджан; 8 – Сакпанды; 9 – Мештуярык; 10 – Тотугем; 11 – Тотугем-2. По: (Deev *et al.*, 2023)

просачивались в карбонатные коллекторы, где и загоранивались на продолжительное время, изменяя свой изотопный состав при длительном взаимодействии с известняками и доломитами. При этом непосредственного влияния атмосферных осадков, а также магматического и биогенного CO₂ на процесс кристаллизации алтайских травертинов не было обнаружено.

Определение представительной серии радиометрических возрастов карбонатов травертинов ²³⁰Th/U-методом, выполненное впервые для алтайского региона, позволило сопоставить их с известными возрастными палеоземлетрясений Алтая, оцененными на основе радиоуглеродного датирования.

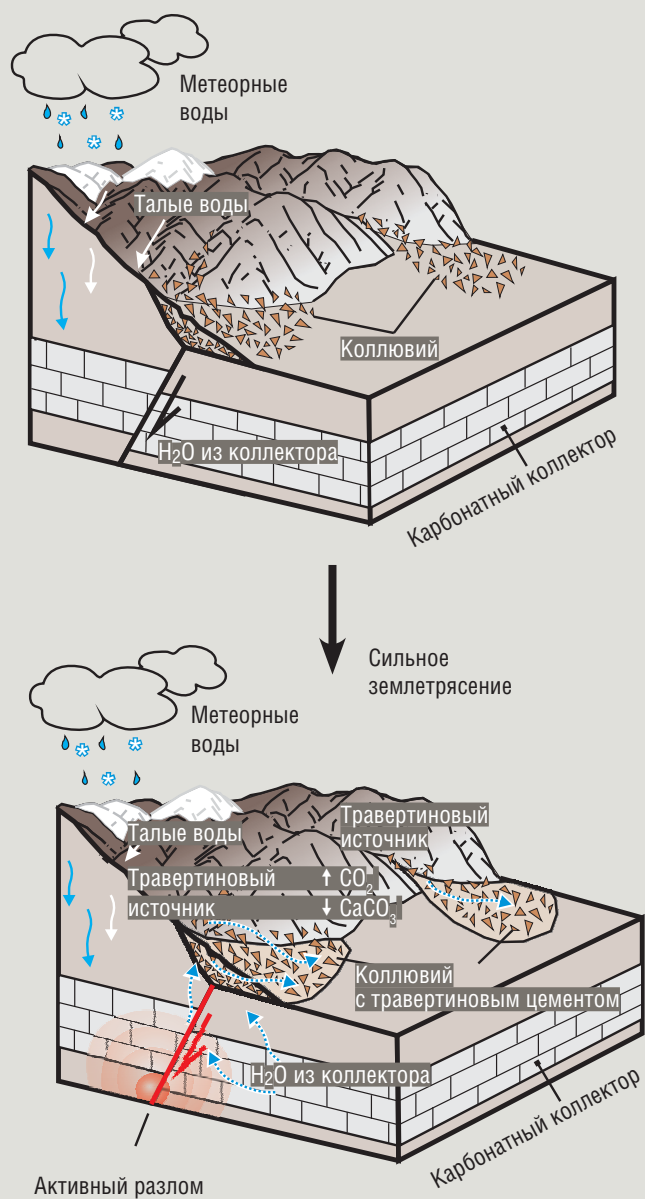


Оказалось, что эпизоды травертинообразования практически совпадают с сильными землетрясениями на временных отметках 1,3; 3,4–4,6; 4,6–5,9; 6,3; 7,1 и 7,5 тыс. лет назад. А формирование травертиновых тел возрастом 9,5 и 11 тыс. лет хорошо укладывается во временной диапазон сильной сейсмичности, характерной для Алтая 8,0–16,0 тыс. лет назад. Все это позволяет использовать травертины как независимый инструмент датирования палеосейсмических событий.

Такой подход важен еще и потому, что поверхностные разрывы землетрясений «сглаживаются», как правило, в течение нескольких тысяч лет, что сильно ограничивает их применение для определения возрастов древних землетрясений. Зато травертиновые тела, приуроченные к зонам активных разломов, более устойчивы к выветриванию, что позволяет установить более древние эпизоды сейсмической активности.

Так, в пределах алтайского комплекса Тотугем были обнаружены травертины возрастом около 123 тыс. лет. Это время соответствует одному из межледниковых периодов, сопровождавшихся существенным потеплением климата. Вероятно, тогда происходила деградация масштабного покровного оледенения в Горном Алтае, так что активизация Курайского и параллельных ему разломов могла быть следствием реакции земной коры на снятие ледниковой нагрузки, сопровождавшейся перераспределением масс в недрах. Не исключено, что свою роль в этом сыграл и катастрофический сброс вод Курайско-Чуйского озера при прорыве ледниковой плотины (Deev *et al.*, 2023b).

Образцы для ²³⁰Th/U-датирования травертинов тщательно готовятся. На каждый создается «паспорт», где отмечены локализация образца в травертиновом теле, его минеральный состав и изотопно-геохимические характеристики. Вверху – слоистое травертиновое тело комплекса Мештуярык, из которого взят образец, а также изображения его шлифа, полученные с помощью поляризационной световой и сканирующей электронной микроскопии (справа, снизу вверх)



Намного более древние травертины возрастом 400 тыс. лет были найдены на комплексе Балтырган в восточной части Курайской впадины. Они – ровесники ранне-среднеплейстоценовых отложений, которые формировались там при быстром росте окружающих хребтов. Эти отложения копились в краевой части впадины, после чего были подняты и цементированы травертином.

Очевидно, что и в этом случае травертины возникли при землетрясениях, сопровождавших движения по активному разлому. Что подтверждается находками многочисленных сейсмогенных деформаций (*сейсмитов*) в одно-возрастных отложениях района, формирование которых связано с активной динамикой и излиянием подземных вод при древних землетрясениях (Deev *et al.*, 2023b).

Модель формирования «сейсмогенных» травертинов Юго-Восточного Алтая. Метеорные воды просачиваются в подземные проницаемые горизонты в карбонатных породах. Находясь там длительное время, они насыщаются углекислотой за счет растворения карбонатов. При землетрясениях воды, богатые углекислотой, приходят в движение и выходят на поверхность по трещинам, возникшим в зоне активного разлома. На поверхности идет отложение карбонатов (CaCO_3) в ходе реакции разложения углекислоты и удаление из воды CO_2 без участия живых организмов. В местах выхода подземных источников отлагающиеся карбонаты «пропитывают» и цементируют скопившийся там обломочный материал (коллювий), образуя травертины. По: (Deev *et al.*, 2023b)

Травертиновое поле Тотугем. Здесь находятся одни из самых древних травертинов Алтая (справа) возрастом 123 тыс. лет

Травертины можно использовать для решения еще одной задачи. Расстояние между их одновозрастными комплексами на одном разломе позволяет оценить длину зоны трещиноватости, возникшей при одном сейсмическом событии. А этот параметр часто применяется для оценки магнитуды соответствующего землетрясения.

Примером могут служить травертины, сформировавшиеся около 9 тыс. лет назад в пределах комплексов Чейбеккель-2 и Мештуярык, расположенных вдоль Курайского разлома. Расстояние между этими комплексами составляет 60 км, что соответствует значению магнитуды землетрясения 7,1 (Deev *et al.*, 2023b).

Алтайские травертины встречаются локально и далеко не так красивы и зрелищны в сравнении со знаменитыми травертиновыми террасами Памуккале или американского Национального парка Йеллоустоун. Однако комплексное изучение травертинов Юго-Восточного Алтая подтвердило, что эти карбонатные отложения тесно связаны с палеосейсмической активностью.

Определение возрастов травертинов современными методами датирования служит своеобразным ключом к сейсмической летописи региона, которая, в отличие от архивных исторических документов, уводит нас в прошлое на тысячи, десятки и даже сотни тысяч лет. Изучение травертиновых тел позволяет ответить на главные вопросы, которые интересуют всех, кто занимается землетрясениями: «Когда и где произошло землетрясение и какова была его сила?».

Литература
Достовалова М. С. Развитие сейсмодислокаций в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения 2003 г. // Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2004. С. 110–119.

Русанов Г. Г., Деев Е. В., Ряполова Ю. М. и др. Палеогидротермальная активность разломов Горного Алтая по результатам датирования травертинов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2013. № 4 (16). С. 53–64.

Deev E., Dublyansky Y., Kokh S. *et al.* Large Holocene paleoseismic events and synchronized travertine formation: A case study of the Kurai Fault Zone (Gornyy Altai, Russia) // *Int. Geol. Rev.* 2023a. V. 65. P. 2426–2446.

Deev E. V., Kokh S. N., Dublyansky Y. *et al.* Travertines of the South-Eastern Gornyy Altai (Russia): Implications for paleoseismology and paleoenvironmental conditions // *Minerals*. 2023b. V. 13. P. 259.

Deev E. V., Panin A. V., Solomina O. N. *et al.* Large paleoearthquakes and Holocene faulting in the Southeastern Gornyy Altai: implications for ongoing crustal shortening in Central Asia // *Int. Geol. Rev.* 2024. P. 1–23.

Hancock P. L., Chalmers R. M. L., Altunel E. *et al.* Travertines: Using travertine in active fault studies // *J. Struct. Geol.* 1999. V. 21. P. 903–916.

Kokh S. N., Sokol E. V., Deev E. V. Post-Late Glacial calcareous tufas from the Kurai fault zone (Southeastern Gornyy Altai, Russia) // *Sedimentary Geology*. 2017. V. 355. P. 1–19.

Pentecost A. *Travertine*. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 446 p.
Teboult P.-A., Durlet C., Gaucher E. C. *et al.* Origins of elements building travertine and tufa: New perspectives provided by isotopic and geochemical tracers // *Sedimentary Geol.* 2016. V. 334. P. 97–114.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНГГ СО РАН (проект FWZZ-2022-0001) и ИГМ СО РАН (проект 122041400176-0)

В публикации использованы фото из архивов авторов