

# Патомский кратер – земной или небесный?

*Этот курганчик в 180 км от г. Ленска, почти на границе Якутии и Иркутской области, обнаружил в 1949 г. геолог В. В. Колпаков. О происхождении кратера высказывались самые разнообразные гипотезы: метеоритный удар, остывший вулкан и даже... молодая кимберлитовая трубка.*

*Экспедиции прежних лет приносили больше новых вопросов, чем давали на них ответы. Наконец, совместные усилия двух институтов СО РАН и двух иркутских университетов позволили сделать определенные выводы.*

*С помощью геологического картирования и дендрохронологического анализа специалисты восстановили последовательность формирования элементов кратера. А геохимические исследования материала кратера и его обрамления выявили зональное распределение в нем химических элементов. На основе полученных фактов одна из гипотез подтвердилась*

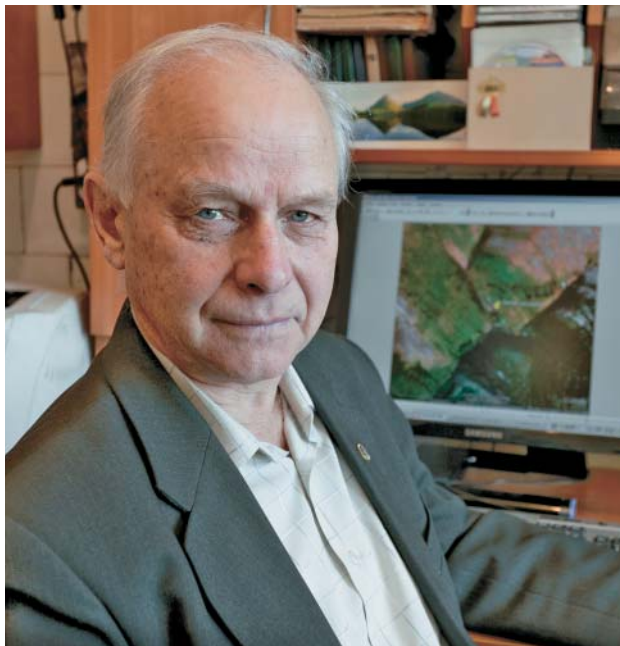
**Ключевые слова:** Патомский кратер, известняк, песчаник, зональность, минералы, флюиды, датировка.

**Key words:** Patom crater, limestone, sandstone, zoning, minerals, fluids, age

Так выглядит кратер с соседней горы на расстоянии 2,5 км, разница высот около 500 м (слева) Центральная горка кратера сложена массивными темно-серыми глыбами известняков Середина кратера поднимается над уровнем рельефа на 24 м (Патомское нагорье, 2006 г.)







АНТИПИН Виктор Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий отделом геохимии эндогенных процессов Института геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор более 280 работ, включая 9 монографий. Участник 3 экспедиций на Патомский кратер



ВОРОНИН Виктор Иванович – доктор биологических наук, заместитель директора Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН (Иркутск). Автор и соавтор более 120 научных публикаций

**Р**едкие сооружения необычной конфигурации всегда привлекают внимание людей. Таким загадочным объектом является и 160-метровой ширины кратер, обнаруженный в середине прошлого столетия на Патомском нагорье в верховьях р. Лена. Какие мощные силы создали его? Стоит ли ожидать возвращения неких опасных природных явлений в этом регионе? А может быть, наоборот – рядом следует искать полезные ископаемые?

Хорошо организованные последние экспедиции обнаружили факты, подтверждающие вулканогенную природу кратера, и определили время его последовательного формирования.

### Немного истории

Прошло уже более 60 лет со времени обнаружения на севере Иркутской области (Бодайбинский р-н) необычного для тех мест кратера. Открывший этот удивительный феномен природы иркутский геолог Вадим Колпаков высказал гипотезу о происхождении Патомского кратера в результате метеоритного удара (Колпаков, 1951).

Сибирская комиссия по метеоритам СО АН СССР в 1963 г. на общественных началах направила экспедицию на Патомский кратер. После исследований ученые не пришли к единому мнению по поводу процессов, приведших к его образованию. В. В. Колпаков в совместной с астрономом обсерватории Иркутского университета С. А. Язевым статье отметил, что подобный кратер мог сформировать только удар сверхплотного метеорита, из тех что ранее никогда не наблюдались (Колпаков, Язев, 2007).

Однако уже в 1951 г. известный геолог С. В. Обручев высказал сомнение о метеоритном происхождении Патомского кратера. По его гипотезе кратер мог образоваться в результате прорыва со значительных глубин газопаровой струи в участке, ослабленном тектоническими разломами.

Несмотря на проявленный в последние годы интерес исследователей к данному природному объекту, детальная информация о слагающих кратер породах была получена лишь в результате деятельности комплексных экспедиций 2006 и 2008 гг. Патомский кратер тогда совместно изучали геологи и геохимики из Института геохимии СО РАН, геофизики Иркутского



Вертолет улетел. Снимок на память – и в путь, к загадочному кратеру. Фото Е. Козырева

государственного технического университета, биологи Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН, а также астрономы из обсерватории Иркутского государственного университета (Антипин и др., 2006, 2008).

Во время этих работ впервые была составлена геологическая карта и получены результаты геологических, петрографических и геохимических исследований пород кратера и его обрамления, которые позволили, наконец, сделать определенные выводы об условиях формирования этого загадочного конуса.

### Вековые кольца кратера

Патомский кратер имеет неоднородное геологическое строение. На фотоснимках отчетливо проявляется его структура, состоящая из четырех основных элементов: внешнего склона конуса, кольцевого вала, кольцевого рва, центральной горки.

Все элементы кратера сложены преимущественно осадочными породами. Преобладающие в районе кратера карбонатные породы соответствуют среднему химическому составу типичных известняков с содержанием кальция выше 50% (в пересчете на CaO). Карбонатные породы из всех зон кратера по составу существенно не различаются.

Важнейшая морфологическая особенность – кольцевой вал кратера (наиболее возвышенная его часть) разделен неглубоким понижением в рельефе на две части, которые формировались в разное время.

Внутренний кольцевой вал образовался раньше внешнего. Среди известняков на нем встречаются единичные глыбы терригенных пород, а именно метаморфизованных сланцев и песчаников. Их так называемая *дресва*, состоящая из грубых обломков миллиметрового и более крупного размера, часто покрыта мхом. Изредка на ней растут лиственницы.

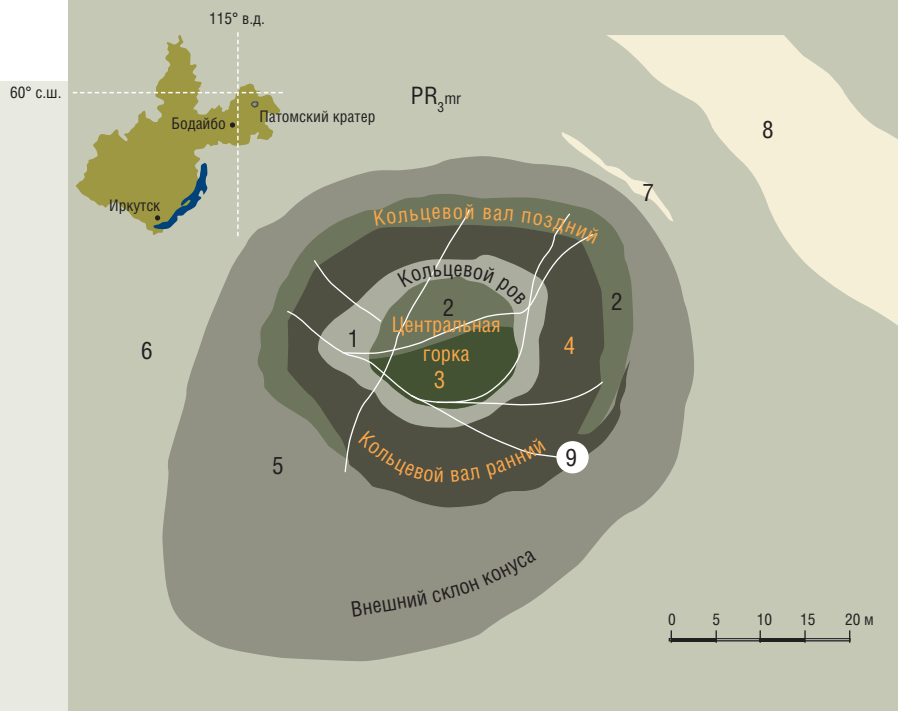
Внешний (поздний) кольцевой вал, в отличие от внутреннего, не содержит глыб терригенных пород. Он сложен темно-серыми массивными кристаллическими известняками, слабо подвергшимися процессам выветривания. На них также встречаются единичные молодые деревья.

Вершина центральной горки сложена массивными кристаллическими известняками, затронутыми выветриванием в минимальной степени – эта часть кратера, по-видимому, сформировалась последней.

Факт зонального распределения горных пород противоречит импактной гипотезе образования Патомского кратера. Действительно, при ударе метеорита о поверхность Земли все элементы кратера формируются практически одновременно. Этому случаю соответствует специальная «импактная» структура, характеризующаяся более плоскими впадинами и невысоким кольцевым валом.

Патомский кратер, напротив, имеет вид насыпного усеченного конуса с крутыми склонами и углублением на вершине. Такая морфология типична для современных вулканических построек. Отношение диаметра





Схематическая геологическая карта Патомского кратера (59°17' северной широты, 116°35' восточной долготы). Составители – В.С. Антипин, А.М. Федоров).

- 1 — массивные кристаллические известняки с кварц-мусковит-карбонатными жилами (кольцевой ров);
- 2 — массивные мелкозернистые кристаллические известняки с жилами кварца (поздний кольцевой вал и центральная горка);
- 3 — существенно выветрелые известняки с редкими

- глыбами метаморфизованных песчаников и сланцев (центральная горка);
- 4 — существенно выветрелые известняки с дресвой этих пород и глыбами метаморфизованных песчаников и сланцев (ранний кольцевой вал);
- 5 — осыпь глыб различных горных пород внешнего склона конуса;
- 6 — вмещающие кратер известняки мариинской свиты протерозоя (PR<sub>3</sub>mg);
- 7 — прослой метаморфизованных песчаников среди

- известняков;
  - 8 — метаморфизованные песчаники;
  - 9 — кольцевые и радиальные зоны разломов в пределах кратера.
- Протерозой (PR) — это интервал геологического времени между 2,5 млрд и 542 млн лет назад. Более поздние комплексы пород в районе кратера не обнаружены. Они, очевидно, были ранее, но в настоящее время эродированы (разрушены) и переотложены в других местах. Поэтому на современном эрозионном срезе обнажены древние породы протерозоя

**Песчаники и сланцы – осадочные горные породы, сцементированные, состоящие преимущественно из силикатных минералов. Сланец имеет слоистую структуру, а песчаник – зернистую (сцементированный песок)**

**Известняки – осадочные горные породы, отложившиеся в водной среде. В основном они состоят из карбонатов кальция и других металлов**

**Карбонатиты – эндогенные горные породы преимущественно карбонатного состава (кальцит, сидерит, доломит), генетически связанные с комплексами ультраосновных (щелочных) пород**

осыпь кратера образовалась не позднее 1770 г., так как в это время на ней появилось самое старое дерево. Возраст же осыпи раннего вала был определен в 250–300 лет (Воронин, 2006; Антипин и др., 2008).

Во время полевых исследований 2008 г. для уточнения датировки был предпринят массовый отбор спилов наиболее высоковозрастных лиственниц в нескольких метрах от внешней осыпи кратера с северной ее стороны, которая сложена массивными кристаллическими известняками позднего кольцевого вала.

После тщательных поисков среди деревьев на внешнем склоне так и не найдено ни одного дерева старше 480 лет. Этот факт обращает на себя внимание, потому что в окрестности средний возраст лиственницы составляет около 600 лет, а иногда встречаются 1100-летние деревья. Кроме того, непосредственно у северной кромки кратера стволы многих деревьев были наклонены, а одно из них лежало на внешнем склоне, оставаясь живым, поскольку часть корней осталась в почве.

Поэтому вполне обоснованно можно предположить, что примерно 500 лет назад здесь произошло активное движение грунта (локальное землетрясение). Его результатом стал массовый вывал деревьев, после которого на склонах выросло новое поколение лиственниц.

Следует отметить, что большинство деревьев вблизи северного окончания осыпи имеют различные аномалии ширины годичного кольца, наклоны ствола или следы механических повреждений (например, шрамы на стволах от ударов камнями) в период 1841–1842 гг. Очевидно, в эти годы стволы исследованных деревьев зафиксировали событие катастрофического характера в районе Патомского кратера. Оно вызвало нарушение и корневых систем деревьев, в результате чего одни из них накренились, другие получили механические повреждения, а у некоторых деревьев радиальный прирост резко снизился.

Возможность, что обнаруженные деревья повреждены в результате лесного пожара, полностью исключается ввиду отсутствия пожарных подсушин. Так как пораненные и поломанные деревья расположены у самой кромки осыпи, наиболее вероятная причина их повреждений – удары глыб, катившихся по осыпи, на последнем этапе формирования внешнего вала.

Итак, дату рождения кратера, по-видимому, следует

**Победа! Водрузив во внутреннем кольце кратера флаг одного из спонсоров – газеты «Комсомольская Правда», экспедиция уточняет план исследований. Фото Е. Козырева**

### Красноречивые спилы

Для выяснения условий формирования Патомского кратера принципиальное значение имеет возраст элементов его кольцевой структуры. Поскольку на кратере растут деревья (немногочисленные лиственницы), подходящим для возрастного исследования методом является дендрохронологический анализ, основанный на измерении количества и толщины годовых колец деревьев.

На основе изучения образцов деревьев, спиленных в 2006 г., был сделан вывод о том, что внешняя каменная

Патомского конуса к его высоте (в пределах 3–8) также весьма характерно для образований эндогенного происхождения (т.е. инициируемых глубинными процессами Земли).

Сравнение результатов современных измерений с данными полувековой давности (на момент первого обнаружения кратера) показывает, что кратер подвергается разрушению. Так, заметно увеличилась протяженность осыпи по склону, что свидетельствует о значительном влиянии процессов выветривания.







С помощью геологических молотков участники экспедиции отбирают пробы горных пород

После сильного механического повреждения части корневой системы радиальный прирост дерева стал очень неравномерным, а с левой стороны прекратился вовсе

В карбонатизированных песчаниках и сланцах можно увидеть под микроскопом кристаллы кальцита  $\text{CaCO}_3$

отнести к концу XV – началу XVI вв., а формирование позднего кольцевого вала – к 1841–1842 гг., т. е. спустя более чем 300 лет после начала становления кратера.

## И запах серы...

О происхождении геологического объекта может свидетельствовать и геохимический анализ составляющих его пород и минералов. Популярно говоря, по химическому составу «подземные» и «небесные» материалы резко различаются. Чтобы решить вопрос генезиса, на Патомском кратере и в его окрестности были собраны образцы всех главных типов горных пород. Их элементный состав анализировался в Институте геохимии СО РАН методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) и рентгенофлуоресцентного анализа (RFA).

Критерием «небесного» происхождения материала принято считать специфический (более равномерный по сравнению с земными породами) характер распределения металлов с атомными номерами в диапазоне 21–30 (например, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu). При этом никель является главным индикаторным элементом, так как обычно содержится в метеоритах в наибольшем количестве, даже образуя уникальные минералы никеля и железа (например, камасит-тэнит).

Результаты химического анализа показали, что терригенные породы раннего кольцевого вала значительно обеднены этими металлами по сравнению с породами за пределами кратера. Например, никеля в песчаниках меньше вдвое, а в сланцах – почти втрое по сравнению со средним его содержанием в этих же породах во вмещающей кратер толще земли. Такой характер распределения концентрации противоречит гипотезе об участии метеоритного вещества в процессах формирования Патомского кратера.

С другой стороны, отдельные зоны кратера, выделенные на основе геолого-петрографических данных, характеризуются и геохимическими различиями. Такая зональность свойственна породам, связанным с влиянием эндогенных процессов.

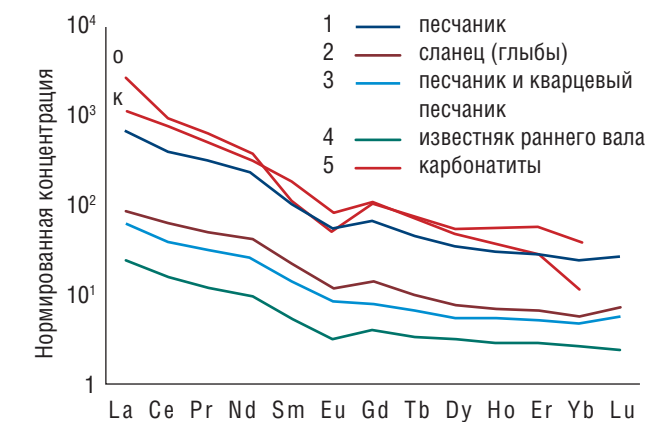
Наибольший интерес представляет вещественный состав отдельных глыб терригенных пород внутри насыпного конуса кратера, вынесенных при его формировании из глубинных горизонтов (горизонтальных слоев земной коры). Оказалось, что в песчаниках и сланцах содержание щелочно-земельных металлов (Ca, Sr, Ba) существенно выше – иногда более чем в полтора раза – по сравнению с теми же породами во вмещающей толще. Эти металлы привносятся растворами глубинного формирования и при химическом взаимодействии с углекислотой  $\text{CO}_2$  осаждаются в разных породах в виде карбонатных минералов.

**Геохимические признаки наличия метеоритного вещества – это высокая концентрации никеля и других химических элементов с близким порядковым номером (скандий, хром, ванадий, железо, кобальт, медь и др.)**

Особенно важно, что в некоторых глыбах песчаников внутри кратера обнаружена повышенная суммарная концентрация редкоземельных элементов (РЗЭ). В отдельных пробах она достигает 557 г/т, что в шесть раз выше, чем в песчаниках вмещающей толще. Оказалось, что в этих песчаниках содержатся минералы сфен, циркон, апатит и флюорит, которые обладают свойством концентрировать РЗЭ в своем составе. Применение метода нормировки по хондритам показало, что по характеру распределения РЗЭ и уровню их концентрации некоторые карбонатизированные песчаники Патомского кратера довольно близки к породам современных карбонатитовых вулканов Восточно-Африканской рифтовой зоны.

Помимо карбонатов, содержащих углерод в окисленном состоянии ( $\text{CO}_2$ ), в породах кратера были также обнаружены восстановленные формы углерода и водорода (в виде СО и  $\text{H}_2$ ), что свидетельствует о глубинном источнике включений карбонатных мине-

В геохимии для описания сравнительного содержания РЗЭ применяют метод нормировки «по хондритам». Для этого концентрацию каждого элемента делят на его среднестатистическое содержание в хондритах (веществе каменных метеоритов). Получившийся спектр относительных концентраций РЗЭ и его индикатор (соотношение атомов La/Yb) характеризуют источник «редких земель»



По соотношениям между редкоземельными металлами породы Патомского кратера (1–4) близки к карбонатитам (5) современных вулканов Восточно-Африканской рифтовой зоны Керимаси (К) и Олдоиньо-Ленгаи (О)

ралов (Летников и др., 1980). Наибольшее содержание СО (около 9 мл/г) зафиксировано в известняках центральной горки и кольцевого рва – участках кратера, где по глубинному вертикальному каналу мог поступать вверх глыбовый материал насыпного конуса.

Сера по праву считается одним из главных элементов «подземья». Хотя общее содержание серы в большинстве пород кратера невелико (менее 0,1%), среди карбонатных пород кратера наиболее богаты серой известняки позднего кольцевого вала и центральной горки – ее концентрация достигает здесь 0,3%. Такое повышение означает, что процесс накопления серы происходил уже на заключительных этапах становления Патомского кратера.

Наличие серы в восстановленном состоянии подтверждается и органолептически: на кольцевом валу кратера весьма ощутим специфический запах «тухлых яиц», свидетельствующий о присутствии сероводорода.



**И**так, эндогенное происхождение Патомского кратера можно считать доказанным. О его вулканогенной природе свидетельствует весь комплекс полученных геологических, петрографических и геохимических данных.

В связи с обнаружением горных пород, обогащенных стронцием и редкоземельными элементами, последующие детальные геолого-геохимические исследования кратера представляют не только научный, но и практический интерес.

Для получения информации о глубинных источниках процессов, создавших этот удивительный феномен природы, надо провести буровые работы на Патомском кратере. Хотелось бы надеяться, что это дело ближайшего будущего.

Таежная экзотика – традиционный амбар на «курьих ножках». Фото Е. Козырева

**Газообразные вещества ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ )** происходят из **глубинных источников мантии (около 30 км)**, среда которой характеризуется восстановительными электрохимическими условиями.

**В приповерхностных слоях земной коры проникающий из воздуха кислород  $\text{O}_2$  окисляет эти вещества до  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{S}$  и  $\text{SO}_2$ .**

**Образующийся углекислый газ  $\text{CO}_2$  участвует в образовании карбонатных минералов**

*Авторы благодарят организаторов и участников экспедиций на Патомский кратер за помощь и финансовую поддержку, а также сотрудников аналитических центров Института геохимии СО РАН и Института земной коры СО РАН А. К. Климову, Л. А. Чувашову и Е. В. Смирнову*

*В публикации использованы фото участников экспедиций Е. Козырева, Д. Семенова, М. Антипина и В. Короткоручко (Иркутск)*



Горные породы на земной поверхности разрушаются под влиянием резких перепадов температур, воздействия ветра и воды и других факторов. Этот процесс называют выветриванием. В результате выветривания известняки внутреннего кольцевого вала из прочных кристаллических пород превратились в пластинчатые, легко рассыпающиеся. Иногда они образуют удивительные формы, наподобие этого каменного «тритона»

#### Литература

Антипин В. С. и др. Экспедиционное обследование Патомского кратера // *Избранные проблемы астрономии. Материалы науч.-практ. конф. «Небо и Земля», посвященной 75-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск. 2006. С. 163–168.*

Антипин В. С. и др. Патомский кратер в Восточной Сибири // *Природа. 2008. № 9. С. 69–75.*

Антипин В. С., Федоров А. М. Происхождение Патомского кратера (Восточная Сибирь) по геолого-геохимическим данным // *Докл. РАН. 2008. Т. 423. № 3. С. 361–366.*

Воронин В. И. Предварительные результаты дендрохронологического анализа спилов лиственницы даурской, отображенных в районе Патомского кратера // *Избранные проблемы астрономии. Материалы науч.-практ. конф. «Небо*

*и Земля», посв. 75-летию астрономической обсерватории ИГУ. Иркутск, 2006. С. 169–176.*

Колпаков В. В. Загадочный кратер в Патомском нагорье // *Природа, 1951. № 1–2. С. 58–61.*

Колпаков В. В., Язев С. А. Патомский конус // *Земля и Вселенная, 2007. № 1. С. 57–65.*

Летников Ф. А. и др. Флюидный режим формирования мантийных пород. Новосибирск: Наука, 1980. 143 с.

Портнов А. М. Кратер на Патомском нагорье // *Природа, 1962. № 1. С. 102–103.*

Портнов А. М. Патомский кратер – след Тунгусского явления? // *Земля и Вселенная, 1993. № 1. С. 77–81.*

Самойлов В. С. Геохимия карбонатитов. М: Наука, 1984. 191 с.