

УДК 551.44(–925.15)

ПЕЩЕРЫ В СЛАБОКАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОДАХ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ: МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И МОРФОЛОГИЯ[#]

© 2024 г. А. А. Булычов^{1*}¹Институт геологии и минералогии имени академика В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

*E-mail: bulychovanatoli@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.03.2023 г.

После доработки 19.08.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2024 г.

Помимо многочисленных подземных полостей, связанных с процессами растворения карбонатных пород, в пределах Алтае-Саянской горной области имеется целый ряд пещер, развитых в некарстующихся и слабокарстующихся породах. Среди них своими размерами выделяются пещеры конгломератовой нарвской толщи Баджейского массива (Восточный Саян, Манский прогиб). Самыми выдающимися пещерами здесь являются Большая Орешная, Дудинская и Баджейская, длина составляет более 50 км, 35 км и 10 км соответственно. Известняки среднегорья Алтая часто контактируют с эффузивными и интрузивными породами и изменены в пределах контактовых зон метаморфизма до плотных мраморизованных пород, что делает невозможным протекание карстовых процессов. Тем не менее в мраморизованных известняках нижнего кембрия каянчинской свиты Горного Алтая развиты крупные пещеры Алтайская и Кёк-Таш общей протяженностью 4.7 и 3.2 км соответственно.

Детальное картографирование пещер, развитых в некарстующихся и слабокарстующихся породах, показало их тесную пространственную связь с системами новейших разрывных нарушений. В пещерах по зонам разломов обнаружены признаки повсеместной аргиллизации (изменение исходного вещества гидротермальными процессами и замещение его новообразованными глинистыми минералами). Предлагаемый нами механизм формирования пещер в некарстующихся и слабокарстующихся породах сводится к выносу грунтовыми водами аргиллизированного гидротермальными процессами по зонам разломов субстрата без существенного участия растворения (карстовых процессов). Это роднит данный механизм с хорошо известным процессом “глинистого карста”, связанного с суффозией в глинистых породах. Отличие сводится к развитию изученных нами форм и процессов в аргиллизированных разломных зонах, а не в глинистых толщах.

Ключевые слова: спелеогенез, плотность трещиноватости, структурный анализ, разломы, приразломная аргиллизация, цифровое картографирование, сейсмoeлектрические измерения

DOI: 10.31857/S2949178924020057, **EDN:** PNWOME

ВВЕДЕНИЕ

Морфологии и генезис пещер карстового происхождения достаточно хорошо изучены (Цыкин, 1985; Маринин, 1990; Климчук, 2009), при этом считается, что пещеры в слабокарстующихся породах (конгломератах и мраморизованных известняках) редки, незначительны и механизм их формирования до конца неясен (Lipar, Ferk, 2022). Ранее предполагалось, что крупные конгломератовые

пещеры нарвской толщи (Геологическая карта..., 1962) Восточного Саяна образовались благодаря карбонатной составляющей матрикса пород и высокой пористости (Цыкин, 1990). Однако в последние 30 лет спелеологи обнаружили, что пещеры длиннее втрое, чем это считалось ранее, благодаря их продолжению в зонах дробления с некарбонатными обломками. Установлено, что в данных пещерах глинистые отложения кольматируют трещины и поры, блокируя разгрузку, тем не менее подземная гидросеть без задержек выносит воду с глинистым материалом из пещер по зонам разломов (Boultychov, 1999). Спелеогенез, обусловленный дизъюнктивными нарушениями, отражается в рельефе дневной поверхности. Породы нарвской конгломератовой толщи распространены

[#] Ссылка для цитирования: Булычов А. А. (2024). Пещеры в слабокарстующихся породах Алтае-Саянской горной области: механизм формирования и морфология. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 2. С. 108–125; <https://doi.org/10.31857/S2949178924020057>; <https://elibrary.ru/PNWOME>

на площади 132 км², но только на участке 36 км² обнаружены незначительные приповерхностные полости. При этом на данной территории изучены пещеры-гиганты (рис. 1), представляющие собой природный феномен, приуроченный к областям повышенной неотектонической раздробленности.

На Горном Алтае известняковый карст известен на Тегерцком, Теректинском, Сумультинском хребтах (Максимов, 1993а). На хребте Иолго наиболее значимые пещеры Туткушская, Каракокшинская, Большая Медведица, Кат-Шу, Жёлтый Бантик, на Семинском хребте — пещеры Алтайская, Кёк-Таш,

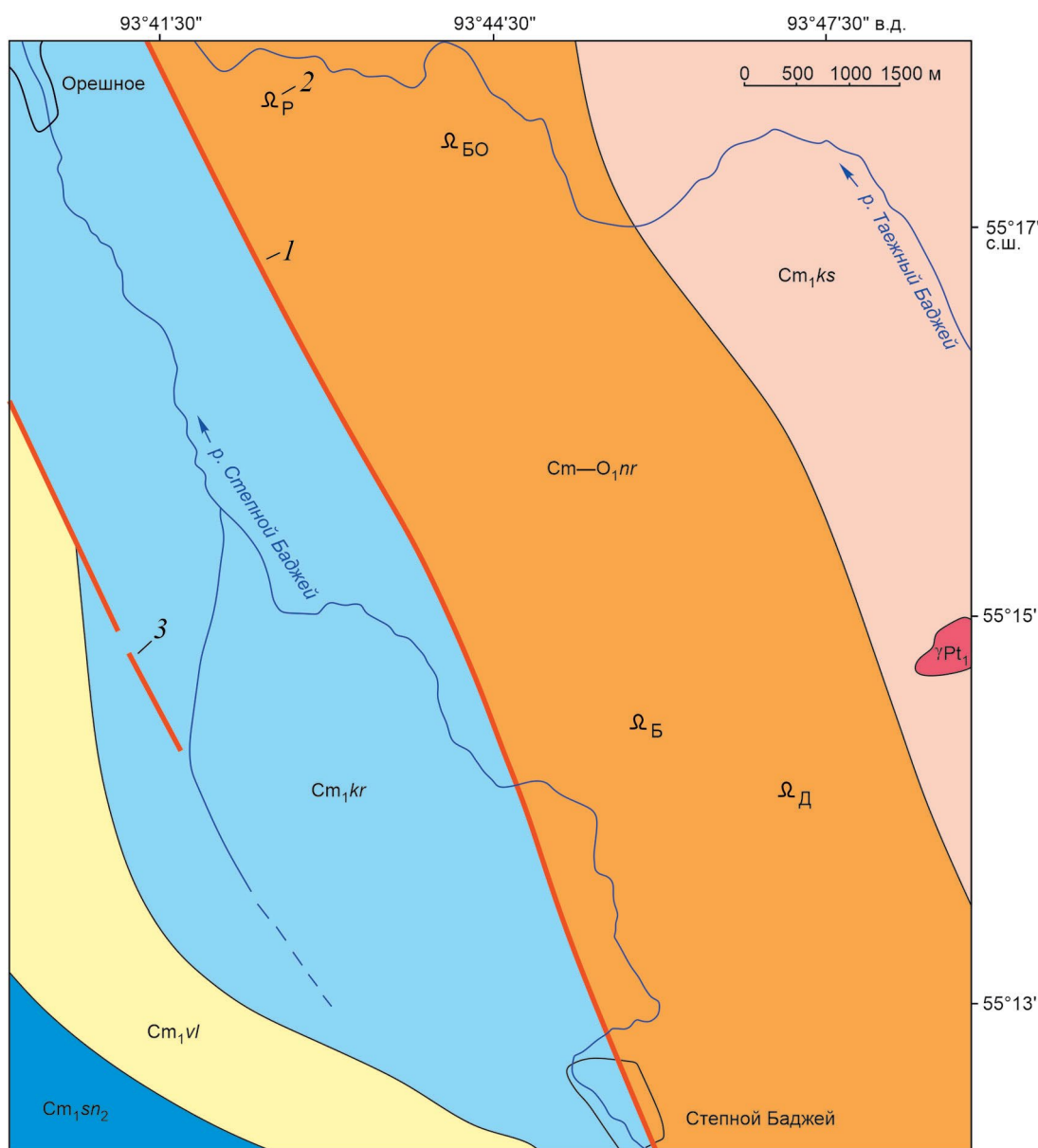


Рис. 1. Геолого-тектоническая схема Баджейского участка.

Cm₁sn₂ — синерская подсвита, массивные доломиты; Cm₁vl — свита Выезжего лога, глинистые сланцы; Cm₁kr — крольская свита, доломиты; Cm₃-O₁nr — нарвская конгломератовая толща, известковисто-глинистые конгломераты, валуны-доломиты, галька-кварцевый кремль; Cm₁ks — койская свита, кварцевые песчаники; vPt₁ — микроклиновые гранито-гнейсы; 1 — разломы; 2 — пещеры (Р — Ручейная, БО — Большая Орешная, Б — Баджейская, Д — Дудинская); 3 — предполагаемые разломы.

Fig. 1. Geological-tectonic scheme of Badzheiskii site.

Cm₁sn₂ — sinerskaya subsuite, massive dolomites; Cm₁vl — suite of Vyezshii Log, clayey shales; Cm₁kr — krolskaya suite, dolomites; Cm₃-O₁nr — narva conglomerate sequence, calcareous-clayey conglomerates, boulders-dolomites, pebbles-quartz flint; Cm₁ks — koiskaya suite, quartz sandstones; vPt₁ — microcline granite-gneisses; 1 — faults; 2 — caves (P — Rucheynaya, BO — Big Oreshnaya, B — Badzheiskaya, D — Dudinskaya); 3 — assumed faults.

Геофизическая, СОАНтехническая, Дуэт (Максимов, 1993б).

Развитие карста на Горном Алтае происходит в районах древнего магматизма, который замедляет карстогенез, так как изменяет состав прилегающих карбонатных пород за счет метаморфизма (Михайлов, 1961). Измененные карбонатные породы имеют мелкозернистую структуру, что исключает или затрудняет протекание карстовых процессов (Гвоздецкий, 1954). Но, несмотря на это, известен ряд крупных пещер (Кёк-Таш, Алтайская) в слабокарстующихся мраморизованных известняках нижнего кембрия (Геологическая карта..., 1977), развитие которых по нашим наблюдениям приурочено к областям интенсивных неотектонических разрывных дислокаций.

Целью данного исследования является доказательство ведущего значения тектонического фактора в формировании крупнейших пещер в слабокарстующихся породах Алтае-Саянской горной области, так как к разрывным зонам приурочена гипогенная активность. Нами предложен механизм формирования полостей, основанный на хорошо изученном феномене приразломной аргиллизации (Волостных, 1972). Мы выделяем 3 этапа: а) формирование зоны дробления, б) проработка гидротермами (аргиллизация), в процессе которого формируются объемные полости, не связанные с поверхностью (замкнутая система), в) вынос аргиллита грунтовыми водами.

Разработанная концепция позволила прогнозировать и совершать открытия новых полостей в некарстующихся породах в зонах новейших разломов, прослеженных геофизическими методами.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При изучении пещер проводилось выявление линейных структур: высоких, протяженных, прямолинейных пещерных галерей, заложенных по крупным раскрытым тектоническим нарушениям. Линейные структуры имеют вертикальные или почти отвесные стены с признаками зеркал скольжения или без таковых из-за эрозии дренирующими водотоками. Выявлялись сопутствующие зоны дробления, брекчии и выдвигалось предположение их тектонического происхождения. Высота достижимой части разломов определялась измерениями после стенных восхождений с применением альпинистской техники и картографированием с помощью лазерной съемки, где это представлялось возможным. Для более детального выявления систем разломов оказалось необходимо инструментальное картографирование. Некоторые современные методы картографиро-

вания пещер (Kempe, Bauer, 2017; Mitchell, 2017) и визуализации поверхности (Hellstrom, 2017) оказались либо слишком дорогими, либо трудоемкими. В наших подземных измерениях мы остановились на применении лазера Leica HDS7000. На поверхности выявлялись участки повышенной плотности трещиноватости (Каждан, Гуськов, 1990), а для верификации использовались аэрофотоснимки с их последующей инструментальной обработкой (Катаев, 1999). Использовалась программа Surverx-Win 32 компании Inkscape (Golicz, 2017) для обработки изображений; в программе "therion" применены расширения .3D, .loch, .ashx. По данным структурного анализа массива (Катаев, 1999) в полевых условиях измерялся и рассчитывался параметр трещинной пустотности.

На поверхности проводилось структурно-тектоническое профилирование (Катаев, 1999), основанное на предположении (Апродов, 1952) о волновой природе плотностного распределения трещиноватости, что объясняется эффектом отражения естественных полей упругих волн от поверхностей границ раздела сред и появлением "стоячих" волн, в кучностях которых развивается более интенсивная трещиноватость, а между ними сохраняется относительно плотная порода. Исходными данными являлись результаты полевых измерений расстояний между трещинами, фиксированными в обнажениях горных пород и в вырытых шурфах по линии профиля. Результаты обработки измерений с помощью математической статистики (Мягков, 1984) представлены на графиках линейных аппроксимаций наблюдений по профилю исследования в виде корреляционных функций и энергетических спектров. Для усиления значения периодической составляющей использовался метод, основанный на оценке спектральной плотности дисперсии при равном расстоянии между точками наблюдения, получаемой в результате разложения в ряд Фурье корреляционной функции (Каждан, Гуськов, 1990). Из-за недостаточной обнаженности расстояния между точками замеров иногда не равны, поэтому спектральная плотность дисперсии заменялась кусочно-линейным энергетическим спектром. Для осреднения кусочно-линейной функции использовался метод аппроксимации полиномом 8 степени. Из полезной гармонической составляющей энергетического спектра вычитаются значения случайной составляющей фона, имеющие бета-распределение Фишера, для которого оценивается математическое ожидание и стандартное отклонение для проверки принадлежности пиков спектра к случайной составляющей. По энергетическим спектрам амплитуд

выявлялись зоны повышенной плотности трещиноватости по профилям массива.

Для обнаружения близко расположенных к поверхности (3—20 м) полостей применялись геофизические методы, включающие электро- и сейсморазведку (Cardarelli et al., 2010). Мы применили комбинацию обоих методов в одном эксперименте: провели сейсмо-электрические (Boulytchov, 2000; Sorokina, Boulytchov, 2001) измерения на поверхности на относительно горизонтальных участках. Следует отметить, что в полевом эксперименте по методу сейсмоэлектрического эффекта необходим источник упругих волн, эквивалентный энергии 100 кг заостренной “болванки”, падающей с высоты 1.5 м. Обязательна специальная расстановка принимающих антенн электрического отклика для вычитания регулярных шумов, превышающих по амплитуде полезный сигнал (Mikhailov et al., 1997). Также немаловажно, чтобы граница в разрезе разделяла среды с отчетливо разными физическими свойствами.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗУЧЕННОСТЬ

На спелеогенез Алтае-Саянской горной области влияют два основных фактора: литология пород и эрозионная расчлененность. Карстующиеся породы формировались в регионе в палеозое (Цыкин, 1990; Маринин, 1990), аргиллизированные породы и эрозионное расчленение территории происходили в кайнозое на фоне общего воздымания, вызванного неотектонической активизацией. Территория Алтае-Саянской горной области сложена породами преимущественно палеозойского и позднепротерозойского возраста, представленными интрузивными, осадочными или терригенно-эффузивными отложениями (Михайлов, 1961), которые нередко пронизаны интрузивными внедрениями гранитов. Карбонатные толщи осадочных пород сформированы плотными мраморизованными известняками, в меньшей степени мраморами и редко доломитами. Карстующиеся породы рассредоточены, их первичное горизонтальное залегание сильно нарушено. Карстификация (Максимович, 1963; Ford, Williams, 2007) карбонатных пород происходила в раннем и среднем кайнозое. На плейстоценовом этапе спелеогенеза ведущими факторами служили углубление эрозионных долин и развитие пещерных систем по тектоническим разломам, что демонстрируется в данной работе.

Основная фаза новейшего орогенеза приходится на плейстоцен, она продолжается до настоящего времени, что проявляется в высокой сейсмичности

территории с сосредоточением эпицентров землетрясений вдоль новейших разломов (Novikov, Sokol, 2007; Новиков и др., 2014, 2019). В процессе динамичных тектонических движений изменяются уровни базисов эрозии, что в свою очередь приводит к смещению гидродинамических зон в массивах горных пород и, как следствие, к образованию современных пещерных систем и подземных рек.

Район Манского прогиба (Восточный Саян) представляет собой часть крупного синклиория. Нарвская конгломератовая толща мощностью 800—1000 м кембрия—нижнего ордовика состоит из плотных доломитовых валунов, кремниевое-кварцевой гальки и известковисто-глинистого матрикса (Геологическая карта..., 1962). Локальный карстогенез Р. А. Цыкин связывал со структурой породы, состоящей из обломков и карбонатно-глинистого цемента, где “растворение любого из компонентов приводит к выборочной потере прочности” (Цыкин, 1990). Цемент породы имеет высокую степень пористости. Порода, слагающая валуны, мелкозернистая. Пласты конгломерата падают в юго-западном направлении с наклоном от 30—450, иногда до 800. В пещерах на глубинах 40—80 м по межпластовым трещинам заложены субгоризонтальные и слабонаклонные галереи, образуя выраженные два этажа. Присутствие бикарбоната кальция в водяном паре подтверждают многочисленные экссулаты: сферолиты, зерна, каменные цветы (Цыкин, 1985) и галерея кристаллов, глиняный пол которой устлан кристаллическими сноповидными агрегатами. В пещерах плювиал прослеживается по следам озерных уровней.

Из обзорной карты района пещер (Цыкин, 1990) видно, что преобладают низкогорья со слабо расчлененными широкими хребтами-нагорьями, разделенными друг от друга глубокими тектоногенными долинами. Широкие плоские водоразделы — реликты поверхности выравнивания. Морфология рельефа препятствует поверхностному дренажу и способствует прониканию поверхностных вод по зонам трещиноватости с разгрузкой в долины, разделяющие хребты. Входы в пещеры расположены на высотах 600—650 м, базис эрозии 250—280 м. Рельеф поверхности сформирован денудацией. Карст на склонах сильно задернован и слабо выражен на незначительных фрагментах выположенных поверхностей. Генезис пустот преимущественно тектоно-денудационный с накоплением суглинков и обломочного материала. Воды пещерных водотоков, эрозионная деятельность которых является основным фактором современной динамической системы пещеры, формируются за счет конденсации водяного пара и инфильтрации воды

с поверхности, поэтому Большая Орешная и Баджейская пещеры продолжают развиваться (в последние годы изучены новые системы и гроты, в которые 40 лет назад невозможно было попасть из-за их недостаточного сечения).

Постоянные водотоки с небольшим расходом (до 3.5 л/с) текут по суглинкам, но основные ручьи врезаны в коренные породы. Временные водотоки интенсивно эродируют стены в вертикальных разломах и трещинах. Постоянные небольшие озера образовались за счет кольматации дна гротов или галерей суглинком. Крупные озера расположены на нижних уровнях пещер, но стока их на поверхность не обнаружено. Морфология местности показывает, что Баджейская пещера была вскрыта нивально-эрозионным провалом (глубина 23 м) и развивалась первоначально на этом же уровне, в то время как Большая Орешная была вскрыта склоновой денудацией и развивались одновременно на разных уровнях, как и Дудинская пещера, вскрытая раскопкой узости в гроте на склоне горы.

Современная сеть разломов, по которой развиваются пещеры в конгломератах нарвской толщи, была выявлена в результате наших исследований, и мы полагаем, что новейшая тектоника внесла решающий вклад в спелеогенез и сопутствующие гипогенные процессы в слабокарстующихся породах и обусловила размеры и пространственную (“решетчато-коробчатую”) геометрию полостей. В отличие от этого типично карстовые системы в карбонатах имеют трубчато-коридорную морфологию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работы в основном были сосредоточены на наиболее крупных пещерах в конгломератах и мраморизованных известняках Алтае-Саянской горной области.

Пещеры Большая Орешная, Баджейская, Дудинская заложены в конгломератах, имеющих сложную и неоднородную структуру (“решетчато-коробчатую”) по площади распространения и по глубине (Геологическая карта..., 1962). Конгломераты нарвской толщи дислоцированы разломами растяжения, являющимися оперяющимися структурами системообразующих разломов право-сдвигового кинематического типа (Новиков, 1998), имеют плотную сеть трещиноватости, местами прорываются микроклиновыми гранитами. Как правило, пещеры заложены на склонах с резкими изгибами горизонтальных линий, что можно проследить на орографических картах.

От главного входа пещера Большая Орешная имеет глубину 155 м (по фронтальной проекции).

Ниже этого уровня спелеологи погружались в сифон на 35 м. Самая высокая точка пещеры (система “Застрем”) находится на 44 м выше главного входа, поэтому амплитуда составляет 234 м. Общий объем пустот оценивается более чем в 400 000 м³. Параметр трещинной пустотности по замерам на плато в районе вершины горы оказался равным 0.1–0.2, что является аномально высоким значением. Все отдельные части и системы пещеры тщательно нанесены на карту и в общей сложности составляют более 50 км, но синтезировать их все в общую карту пока трудно (Boulytchov, 1999, рис. 2) из-за сложности трехмерного лабиринта и взаимных корреляций разных систем пещеры.

В глубинах пещеры Большой Орешной нами проведены наблюдения протяженных линейных структур со сводами, не достигаемыми освещению мощными фонарями, с признаками зеркал скольжения, что позволяет предположить их тектоническое (разломы 1–8, рис. 2) происхождение (углы наклона 900 и редко понижаются до 700). Характер дизъюнктивного нарушения (сбросы) удалось выявить лишь в двух случаях (табл. 1), так как стены разломов эродированы и нередко покрыты натечной коркой. Разломы 1–8 не удалось проследить с поверхности из-за сильной задернованности склонов массива. Дизъюнктивное нарушение на ЮЗ схемы (на рис. 2 без номера) предположительно выделено посредством выявления зон повышенной плотности трещиноватости и по дешифрированию аэрофотоснимков. Благодаря этому прогнозу нами была открыта значительная система Сибирская (на рис. 3 показана синим цветом, основная часть пещеры — черным цветом).

Системы Сибирская, Лотос и “Стрем” отделены от основной части пещеры разломом Вертикаль (Bulychov, Sorokina, 2017) шириной до 20 м, который приводит к предвершинному плато, где заложена близлежащая к поверхности часть пещеры Большая Орешная. В результате обработки геофизических измерений предположены пустоты на глубинах 3–8 м, поэтому был преодолен глыбовый завал в системе “Стрем” снизу вверх и открыта система “Застрем”, которая оказалась очень близко к дневной поверхности (3–5 м), но полностью перекрыта валунами, сцементированными карбонатно-алевритовым матриксом.

Предположение о возможном продолжении пещеры по верхним горизонтам привело к поискам фрагментов древних поверхностей выравнивания вблизи вершины горы и в направлении значимой пещеры Ручейной, которая активно развивается в сторону

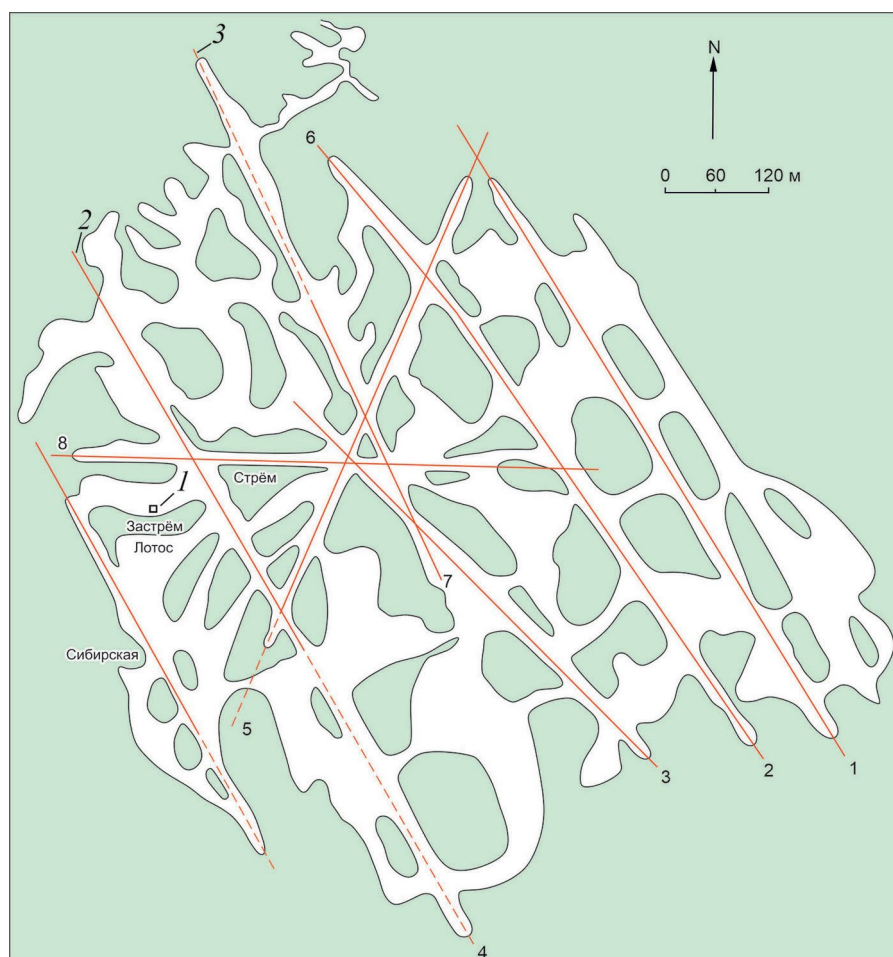


Рис. 2. Схема пещеры Большая Орешная и прослеженные разломы, по которым развита пещера. 1 — площадка геофизических измерений; 2 — разломы, их номера (названия в тексте) и соответствующие им линейные структуры пещеры; 3 — предполагаемые разломы; тонирование — массивы пород.

Fig. 2. Scheme of Big Oreshnaya cave and traced faults along which the cave is developed. 1 — geophysical measurement site; 2 — faults, their numbers (names in the text) and appropriate linear cave structures; 3 — assumed faults, toning — the rock massive.

Таблица 1. Параметры разломов, выявленных в глубинах пещеры Большая Орешная

Table 1. Parameters of faults identified in depths of Big Oreshnaya cave

Разломы: номер и название на рис. 2 и 3	Высота достижимой части: лазерная съемка, м / топосъемка после стennого восхождения, м	Прослеженная длина (суммарная), м	Прослеженная амплитуда сброса, м
1 Внеземная галактика	60 / 40	300	—
2 Озёрный	60 / 30	300	20
3 Каторжный	40 / 20	200	—
4 НГУ	30 / 20	400	—
5 Колокольный	40 / 20	200	—
6 Сурдовский	30 / 20	100	—
7 Проходной	30 / 20	200	—
8 Вертикаль	90 / 70	250	20

Большой Орешной. С помощью тщательного исследования на местности были выявлены локальные плато и зоны сгущения трещиноватости (возможно,

разломов, рис. 3). Отчетливо видно (рис. 3), что пещера Большая Орешная развита в блоке, ограниченном сетью разломов, что на топографической



Рис. 3. Выявленные разломы и привязка карты пещер Большой Орешной и Ручейной к дневной поверхности. 1 — площадка геофизических измерений; 2 — разломы, их номера (названия в тексте) и соответствующие им линейные структуры пещер; 3 — предполагаемые разломы; 4 — горизонталы с отметками высот; 5 — поверхности выравнивания; тонирование — массивы пород.

Fig. 3. Identified faults and the map binding of Big Orechnaya and Rucheynaya caves to the surface. 1 — geophysical measurement site; 2 — faults, their numbers (names in the text) and appropriate linear cave structures; 3 — assumed faults; 4 — horizontal lines with elevation marks; 5 — alignment surfaces; toning — the rock massive.

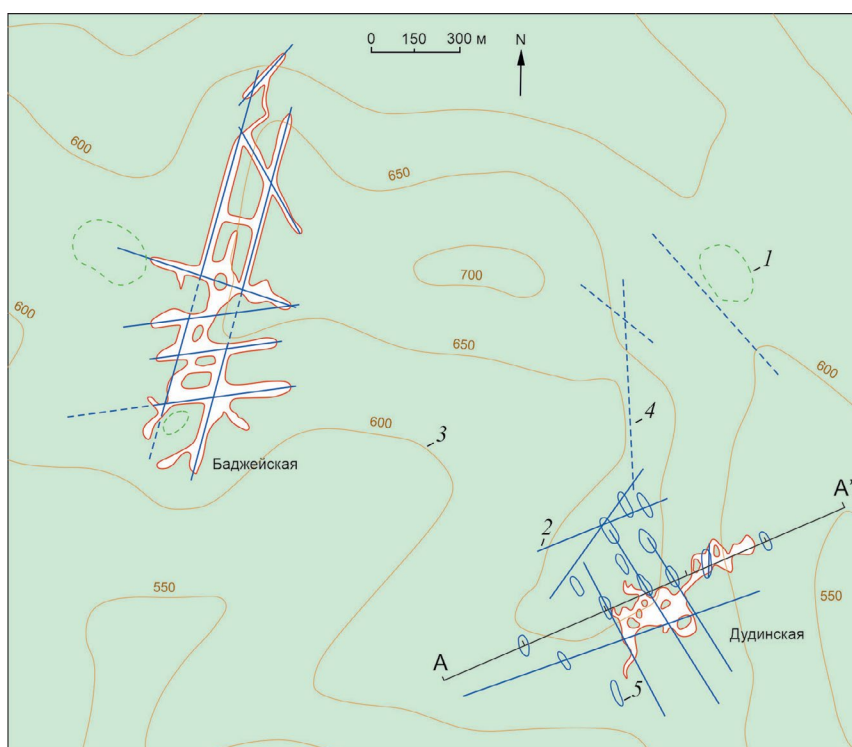


Рис. 4. Выявленные разломы и привязка пещер Баджейская и Дудинская к дневной поверхности. А—А' — профиль измерений трещиноватости; 1 — локальные плато; 2 — разломы; 3 — горизонталы с отметками высот; 4 — предполагаемые разломы; 5 — зоны повышенной плотности трещиноватости; тонирование — массивы пород.

Fig. 4. Identified faults and the binding of Badzheiskaya and Dudinskaya caves to the surface. А—А' — fractures measurements profile; 1 — local plateaus; 2 — faults; 3 — horizontal lines with elevation marks; 4 — assumed faults; 5 — zones of increased density of rock fracturing; toning — the rock massive.

карте показано резким изгибом горизонталей. Более того, удалось предположить, что разлом (или зоны высокой плотности трещиноватости) продолжаются к западу от основного массива пещеры, где спелеологами пока ничего не обнаружено. Аналогичные наблюдения произведены на массиве Баджейской пещеры (рис. 4), в результате чего на пересечении дизъюнктивных нарушений была выявлена новая пещера Дудинская (оперативно отснято в 2022 г. более 35 км ходов с пропастями и “решетчато-коробчатым” лабиринтом).

Как продолжение исследования направлений простирания пещеры Дудинской было выполнено структурно-тектоническое профилирование по методике, описанной В. Н. Катаевым (Катаев, 1999), для чего произведены полевые замеры систем трещин на поверхности. В результате обработки кусочно-линейной функции распределения трещиноватости был построен и проанализирован энергетический спектр амплитуд плотности трещин. На графике полиномиального осреднения линейной плотности трещин по профилю А–А' (рис. 5) и на графике спектра амплитуд плотности трещин (рис. 6) отчетливо выделяются четыре пика гармоник на соответствующих пикетах 620, 740, 850 и 980 м, и менее отчетливо на пикетах 300 и 1280 м, при этом показаны привязки дизъюнктивных проявлений по профи-

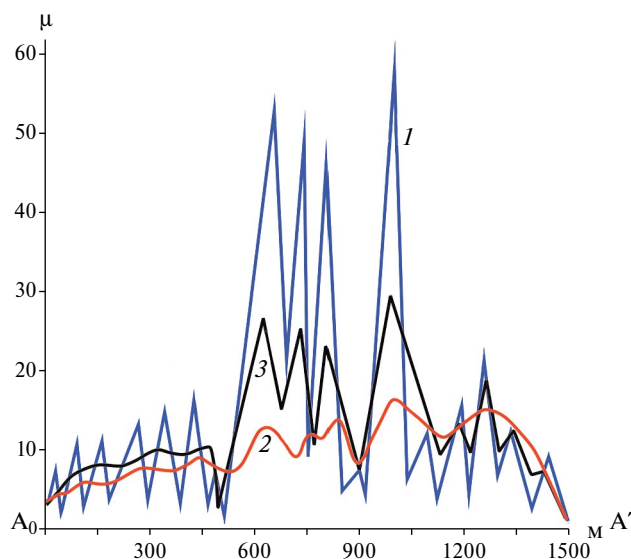


Рис. 5. Осреднение первичных данных по профилю А–А' на участке Дудинская пещера.

1 — исходная функция; 2 — полиномиальная; 3 — осреднение.

Fig. 5. Averaging of primary data along the A–A' profile at the Dudinskaya Cave site.

1 — original function; 2 — polynomial; 3 — averaging.

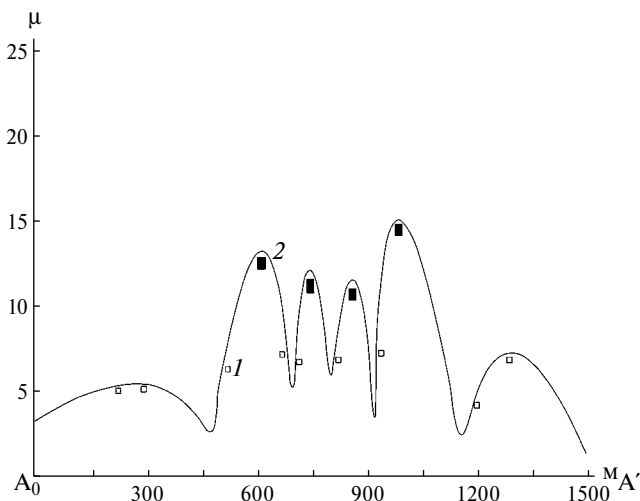


Рис. 6. Спектр распределения плотности трещин по профилю А–А' на участке Дудинская пещера. 1 — зоны дробления; 2 — зоны разломов.

Fig. 6. Fracture density distribution spectrum along the A–A' profile at the Dudinskaya cave site.

1 — fragmentation zones; 2 — fault zones.

лю наблюдений. Пиковые значения распределения тектонической трещиноватости, представленные на рис. 5 и рис. 6, соответствуют местоположению зон относительно повышенной плотности трещин, выявленных в массиве по профилю А–А' (рис. 4).

В результате анализа результатов структурно-тектонического профилирования были предсказаны направления продолжения пещеры Дудинской (на Ю и ССВ), что подтвердилось впоследствии прямыми спелео-прохождениями в пещере (рис. 7). Признаки дизъюнктивных нарушений центральной части пещеры проявляются в зонах дробления и линейных структурах, расположенных ближе к дневной поверхности, зато глубоко заложенные галереи развиты по отчетливым тектоническим разломам (1 — Стрела, 2 — Колокол, 3 — «тропа Хошимина»), не выявленным анализом данных с поверхности (рис. 7). Высота достижимой части разломов (либо посредством топосъемки после восхождений, либо лазерными измерениями) оказалась от 20 до 80 м, длина от 90 до 250 м, ширина от 0.5 до 5 м.

В нижних частях разломов “тропа Хошимина” (галерея Крокодила) в пещере Дудинской и НГУ в пещере Большой Орешной обнаружены признаки аргиллизации: светло-коричневые — желтоватые (палевые) аргиллиты, что соответствует наблюдениям (Разумова, 1977). Водородный показатель в пробе раствора, измеренный автономным рН-метром Ohaus ST300-B, оказался не выше значения 5.5. Аргиллиты оказались

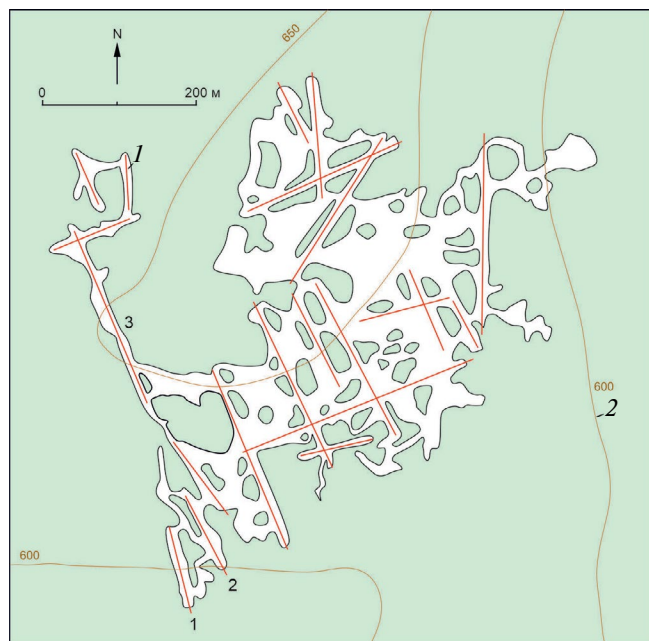


Рис. 7. Разломы, выявленные внутри пещеры Дудинской, и привязка к поверхности.

1 — разломы, их номера (названия в тексте) и соответствующие им линейные структуры пещеры; 2 — горизонталы с отметками высот; тонирование — массивы пород.

Fig. 7. Faults identified inside the Dudinskaya cave, and a binding to the surface.

1 — faults, their numbers (names in the text) and appropriate linear cave structures; 2 — horizontal lines with elevation marks; toning — the rock massive.

по составу близки к иллит-сметиту (по результатам рентгенофазового анализа “Дрон-8”) с включениями SiO_2 и полевого шпата, размер зерен которых не более 0.02 мм (по результатам гранулометрии).

Процесс аригиллизации — это низкотемпературное гидротермальное слабокислотное выщелачивание по зонам тектонических нарушений (Разумова, 1977). При приближении к земной поверхности в связи с понижением температур и разбавлением гидротермальных растворов вадозными водами количество и активность щелочей постепенно убывает и, когда отношение K^+ и H^+ достигает низких значений, происходит гидротермальная глинизация (низкотемпературная аригиллизация) горных пород, т.е. низкотемпературное метасоматическое выщелачивание с образованием глинистых продуктов. Таким образом, интенсивность гидролиза возрастает от высокотемпературных стадий к низкотемпературным. При этом в новообразованных продуктах последовательно замещаются щелочные группы на гидроксильные. Степень “гидротермальности” метасоматоза выражается с помощью гидроксил-по-

казателя. Метасоматические процессы осуществляются наиболее интенсивно в породах, обладающих высокой эффективной пористостью и большой удельной трещиноватостью.

Таким образом, продукты аригиллизации являются метасоматитами зоны смешения вадозных вод с кислотными дериватами эндогенных эманаций, поступавших с глубин по крутопадающим разломам фундамента (Херасков, 1958, 1963). Признаками глинистых метасоматитов зон разложения (трещинные коры) и ареалов их воздействия (площадные коры) являются не пенеппенизированные поверхности складчатого фундамента, а осложняющие эти поверхности зоны повышенной деформации в период орогенного этапа развития геосинклинальных областей (Волостных, 1972). Глинистая компонента механически выносятся вадозными водами в направлении разгрузки пещеры. Мы считаем важным этот процесс в спелеогенезе в связи с глубинными разломами и присутствием интрузивных пород в исследуемом районе (рис. 1).

Повсеместные признаки растворения под воздействием углекислоты на потолках нижнего уровня пещеры Дудинской, возможно, также объясняются гидротермальной аригиллизацией: углекислота является одним из главных компонентов аригиллизующих растворов (Волостных, 1972). Продукты аригиллизации выносятся вадозными водами, что особенно проявляется в пещере в межсезонье. Прослеживаются “подвешенные” меандры в результате растворения аригиллирующими растворами и проседания пола в обширных плоских гротах. В пещере Большая Орешная восходящие трубы нередко упираются в глухие тупики купольной формы, что, вероятно, указывает на их гипогенное происхождение и соответствует исследованиям (Klimchouk, 2007).

Пещера Алтайская — наиболее выдающаяся в Горном Алтае: суммарная длина ходов 4740 м (Булычов, 2019), к тому же она имеет самое сложное вертикальное строение среди всех пещер Дальнего Востока и Сибири. Находится на Камышлинском участке, на плато Метлево (абс. высота входа 870 м), в 25 км от д. Камлак. Из геолого-тектонической схемы района (рис. 8) видно, что нижнекембрийские мраморизованные известняки каянчинской свиты (мощность 400—500 м), в которых заложена пещера, обрамлены кислыми эффузивными, терригенно-вулканогенными породами, гранитами и разломами право-сдвигового типа с оперяющими структурами растяжения (Новиков, 1998). Питание осуществляется за счет водосбора обширного пенеппена. Основные первопрохождения осуществлены в 1982 и 1986 гг. (рук. Булычов А. А., клуб “Каскад”), после чего в каждой

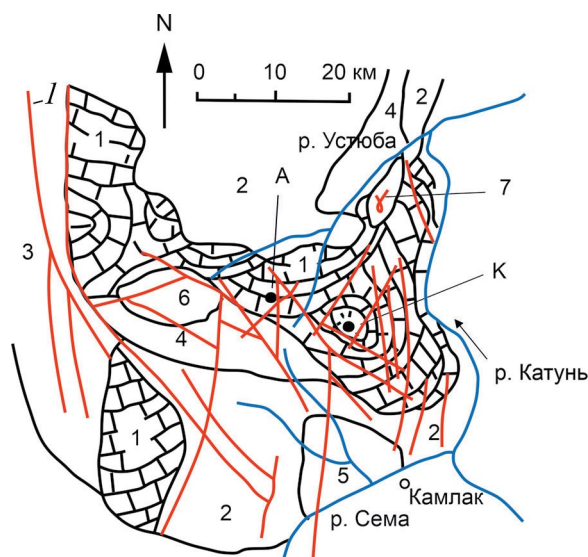


Рис. 8. Геолого-тектоническая схема района пещер Алтайской и Кёк-Таш.

1 — мраморизованные известняки Cm_1kn ; 2 — кислые эффузивы Cm_2km ; 3 — кислые эффузивы D_2kr ; 4 — мрамора $Snbr$; 5 — терригенно-вулканогенные породы $Sn-Cm_1mn$; 6 — лавобрекчия с кантоменатом Cm_{12} ; 7 — гранитоид; пещеры: А — Алтайская, К — Кёк-Таш; I — разломы.

Fig. 8. Geological-tectonic scheme of the region of Altaiskaya and Kek-Tash caves.

1 — marbled limestones Cm_1kn ; 2 — effusives Cm_2km ; 3 — effusives D_2kr ; 4 — marbles $Snbr$; 5 — terrigenous-volcanogenic rocks $Sn-Cm_1mn$; 6 — lava breccia with cantomenate Cm_{12} ; 7 — granitoid; caves: A — Altaiskaya cave, K — Kek-Tash cave; I — faults.

из немногочисленных экспедиций открывались новые галереи, что постепенно “удлиняло” пещеру (Булычев, 1990), и карта дополнялась и уточнялась (Атлас пещер..., 2019). Итоговая полуинструментальная топосъемка и карта с разрезом-разверткой выполнены автором статьи (Булычев, 2019). По результатам структурно-тектонического профилирования и стереоскопического дешифрирования аэрофотоснимков выявлены разломы с простираниями 00, 450, 3150, совпадающими с основными направлениями галерей пещеры (рис. 9, табл. 2), что подтверждает, в первую очередь, тектоническую природу спелеогенеза. В пещере выделяются четыре разновозрастных уровня: приповерхностный — самый древний, вероятно, палеогеновый с проявлениями порошкоподобных пород-“призраков” (Quinif, Verheyden, 2022), два промежуточных уровня вдоль древних русел рек (вероятно, неоген, плейстоцен) и самый молодой (позднечетвертичный) с современной речной сетью. Ручей Веселуха (на дне Зала им. О. Булычовой) впадает в Теплую речку и уходит в 4 сифон (–240 м), при этом есть еще два притока: с глубины 40 м входного ствола пещеры и с хода Ручейного, берущего начало с пропасти Гигантов, где даже в межень низвергается водоток 60 л/с.

Яркая особенность пещеры — это множество восходящих труб и стен, соединяющих нижние уровни с верхними. Три широкие трубы до 160 м высотой упираются в купольные формы (Булычев,

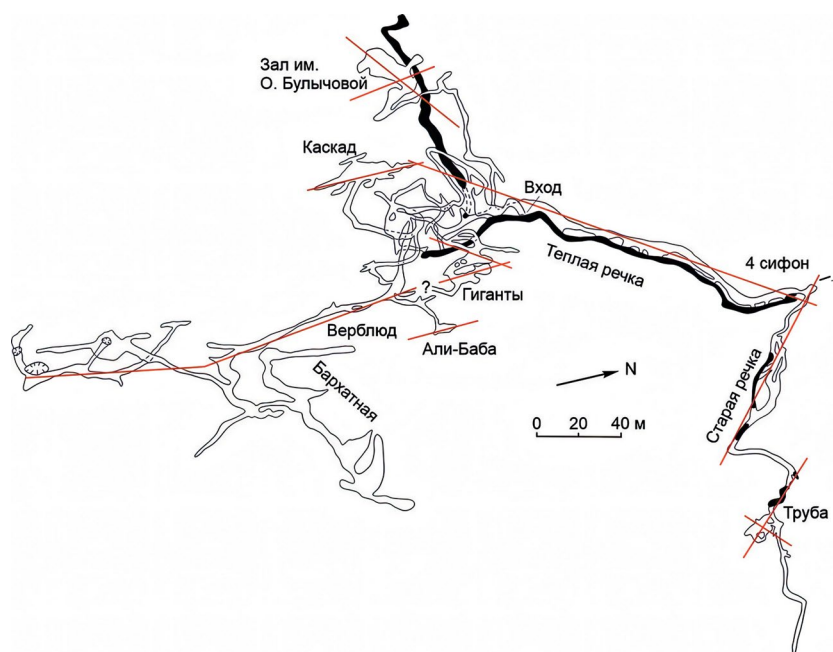


Рис. 9. План пещеры Алтайская. I — разломы.

Fig. 9. The plan of Altaiskaya cave. I — faults.

Таблица 2. Параметры разломов, выявленных в глубинах пещер Алтайская и Кёк-Таш

Table 2. Parameters of faults identified in depths of Altaiskaya and Kek-Tash caves

Разломы: название на рис. 8 и 9	Высота достижимой части: топосъемка после стенного восхождения, м	Прослеженная длина, м
Зал им. О. Булычовой	160	50
Каскад	80	50
Гиганты	110	50
Верблюды	160	150
Али-Баба	40	30
Тёплая речка	60	130
Старая речка	40	80
Труба	60	30
1-й Морской проспект	20	180

2019) с кварцевой коркой, перекрытые сверху дислоцированным слоем плотных известняков, при этом до дневной поверхности остается 15–20 м. С помощью метода сейсмоэлектрического эффекта (Sorokina, Boulytchov, 2001) была выявлена пропасть Гигантов, перекрытая 15-метровой толщей пород. Купольные тупиковые восходящие трубы свидетельствуют о гипогенном генезисе согласно (Klimchouk, 2007). Кварцевая корка может быть объяснена зонограммами аргиллирующих растворов (Волостных, 1972).

В пещере Алтайской обнаружены признаки аргиллизации (рН 5) вдоль разломов в нижних частях пропастей Гигантов и Каскад, что соответствует наблюдениям (Волостных, 1972) о проявлении аргиллизации в виде смещения рН растворов в кислую среду.

Пещера Кёк-Таш (абс. высота входа 890 м) находится в 17 км от д. Камлак, имеет схожие геолого-тектонические условия с пещерой Алтайской: заложена в плотных мраморизованных известняках нижнего кембрия каянчинской свиты (рис. 8) по разломам и трещиноватости с простиранием 00, 1100, 2300. Суммарная длина ходов 3200 м. Пещера является глубочайшей в Сибири, хотя окончательная глубина осталась спорной: гидронивелирование, выполненное автором статьи, показало отметку –340 м (Цыкин, 1990), полуинструментальная топосъемка системы “Нового ручья” достигла 350 м (Boulytchov, 1999), однако лазерная съемка выявила лишь 308 м (Атлас пещер... 2019).

Из тектонической схемы (по результатам структурно-тектонического профилирования и стереоскопического дешифрирования аэрофотоснимков) прослеживается совпадение линий разломов и основных разноуровневых галерей с водотоками (рис. 10).

Входной ствол со второго колодца интенсивно обводнен и приводит в объемный зал, вероятно,

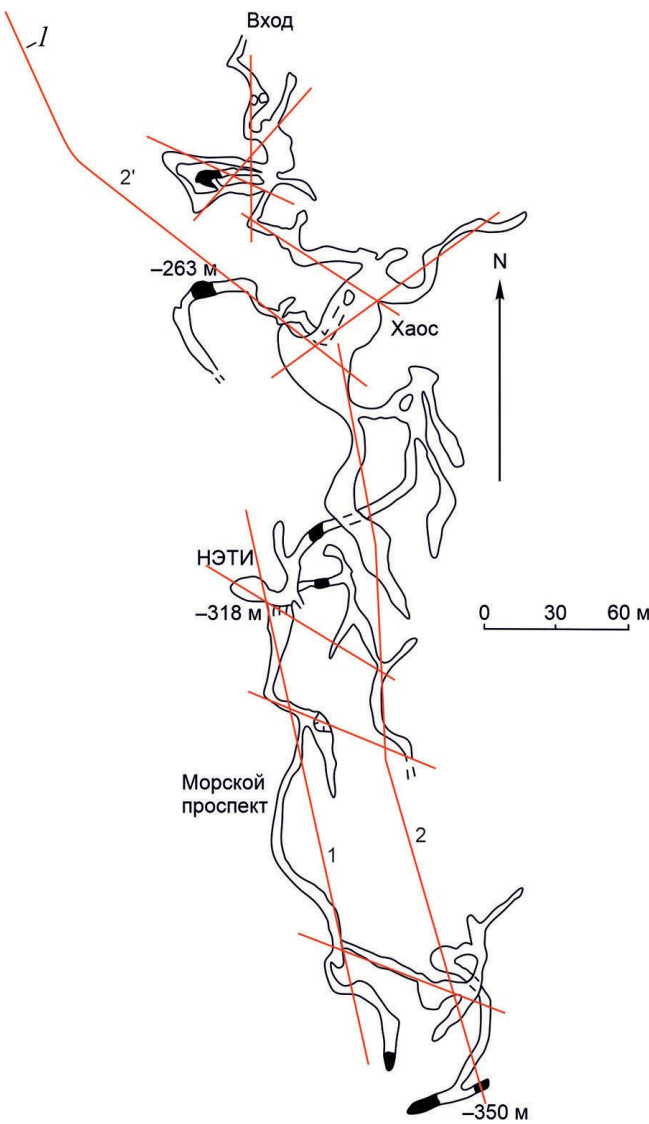


Рис. 10. План пещеры Кёк-Таш. I — разломы и их номера.

Fig. 10. The plan of Kek-Tash cave. I — faults and their numbers.

обвального происхождения площадью более 200 м², высотой более 35 м. Важно отметить, что направления движения вод трех ручьев пещеры не выявлены. Проводилось окрашивание флуоресцеином-уранином (Максимов, 1993б) в р. Бобслей (–263 м). Маркеры вышли на поверхность в Теплом ключе через 10 дней в 3 км от входа и амплитудой 380 м. Ручей на отметке –350 м вытекает из системы, не имеющей отношения к известной части пещеры, и с заметным водотоком (30 л/с в межень) уходит в сифон, разгрузка которого на поверхности не выявлена. Вода при паводке довольно быстро разгружается, значит ходы в районе –300 м, возможно, еще не зона сифонной циркуляции, и пещера может продолжиться вглубь. На дне 56 колодца НЭТИ автором был пройден узкий полусифон, ведущий к обособленной системе (Boulytchov, 1999) с ручьем 5 л/с, не связанным с гидросетью пещеры. В этой системе обнаружены признаки аргиллизации (рН 5): цвет пород изменился с голубоватого, характерного для основной части пещеры, на ярко-желтый, с натеками тонкодисперсных глин, что соответствует наблюдениям об аргиллизации (Волостных, 1972). Анализ отобранных образцов аргиллита-сметита выявил в них зерна SiO₂ размером менее 0.01 мм. Восходящие тупиковые трубы купольной формы также засвидетельствованы в пещерах Алтайской и Кёк-Таш. Отмечены значительные отложения тонкодисперсной глины (на втором уровне пещер: Старая речка и Морской проспект), не вынесенной вадозными водами, но на современном пещерном уровне видим отполированные стены с полностью вынесенной транзитной водой глиной в сторону разгрузки пещер.

В табл. 2 приведена морфометрия разломов, причем их высота определялась топосъемкой после стенных восхождений автора и его коллег с использованием альпинистской техники. Характер разрывных нарушений установить не удалось: предполагаем, что это раздвиги.

ПРИРОДА АРГИЛЛИЗАЦИИ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ

В научной литературе часто можно встретить упоминание о “линейных корях выветривания”, которые понимаются исключительно как результат воздействия поверхностных вод при их проникновении по трещиноватости разломных зон. Распространение линейной коры на глубину ограничивается базисом эрозии, а ее состав, строение и физические свойства идентичны связанной с ней площадной корой, так как оба типа коры выветривания обычно

образуются в процессе химического выветривания под воздействием нисходящего потока поверхностных вод. В качестве “линейных кор выветривания” часто ошибочно рассматривают аргиллизированные породы в зонах разломов (Разумова, 1977; Токарев и др., 2019).

В зонах разломов в конгломератах происходит метасоматическое замещение обломков полевых шпатов и гравилитов на аргиллит. В процессе участвуют низкотемпературные гипобиссальные эманации — газы: CO₂ (95 %), H₂S (3 %), H₂CO₃ (2 %). Двуокись углерода при соединении с водой образует кислоту H₂CO₃, которая является очень агрессивным агентом (скорость реакции возрастает в десятки раз) при коррозии пород, в том числе известняков и мраморов. $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ (Волостных, 1972). На контакте известняков с алюмосиликатами в результате аргиллизации образуется минерал диаспор (Lovering, Shepard, 1960). Под низкотемпературной аргиллизацией, или гидротермальной глинизацией, понимается процесс слабокислотного выщелачивания, протекающий в условиях малых глубин с образованием глинистых и охристых продуктов. Процесс этот осуществляется под воздействием растворов, возникающих при смешении кислотных дериватов эндогенных эманаций с подземными водами, и протекает в интервале глубин одного километра до дневной поверхности при температурах 200 °С и ниже (Разумова, 1977). При гидротермальной глинизации поглощается огромное количество воды, а уголекислота является одним из главных компонентов аргиллизующих растворов (Волостных, 1972).

Элювиальная теория генезиса аргиллизированных зон вначале хорошо увязывалась с представлением о вертикальной фильтрации атмосферных осадков на глубину и затуханием процесса выщелачивания вниз по разрезу. Но с развитием геологоразведочных работ в ряде регионов была установлена большая, иногда огромная мощность (сотни метров) аргиллизированных зон линейно-трещинного и контактово-карстового типа. Тогда для объяснения генезиса таких образований стали привлекать грунтовые воды глубинной циркуляции: артезианские, сифонные или глубинного стока (Корин, 1960; Гинзбург, 1963; Разумова, Херасков, 1963), т.е. в скрытом виде признавалось участие глубинных вод в формировании мощных аргиллизированных зон. При приближении к земной поверхности в связи с понижением температур и разбавлением гидротермальных растворов вадозными водами количество и активность щелочей постепенно убывает и, когда отношение K⁺ и H⁺ достигает низких значений, происходит

гидротермальная глинизация (низкотемпературная аргиллизация) горных пород (Мейер, Хемли, 1970), т.е. низкотемпературное метасоматическое выщелачивание с образованием глинистых продуктов. Таким образом, интенсивность гидролиза возрастает от высокотемпературных стадий к низкотемпературным. При этом в новообразованных продуктах (Казицын, 1979) последовательно увеличивается относительное количество гидроксильных групп и уменьшается количество калия.

Метасоматические процессы осуществляются наиболее интенсивно в породах, обладающих большой удельной трещиноватостью т.е. в зонах разломов. Существенное место в жильном этапе занимают процессы окремнения и окварцевания (Шахов, 1964). С понижением температуры гидротермальных растворов нормальный кварц часто переходит в криптокристаллический и халцедоновидный и нередко сопровождается отложением халцедона или даже опала.

О гидротермально-вадозном происхождении аргиллизированных зон свидетельствуют и следующие данные: появление таких зон в отдаленные геологические эпохи, задолго до возникновения на земном шаре наземной растительности и почвенного покрова (дорифейские и докембрийские глинистые коры). В то же время усиленное поступление по разломам углекислоты в эпохи активного орогенеза (Фурман, 1957) действительно благоприятствовало образованию связанных с разломами глинистых продуктов выщелачивания, но только гидротермально-вадозного, а не элювиального происхождения.

В глинистых породах метасоматического выщелачивания развиты редкометалльные минералы: например, в верхах каолиновой зоны коры выветривания гранитоидов Гарнаба — ниобий-содержащий рутил и гематит (Расулов, 1967); в каолинизированных гранитах Приморья — чёрчит и другие водные фосфаты цериевой группы, обогащенные европием (Ташилкин, 1969); в продуктах выветривания карбонатов — апатит (Зверева, Писемский, 1969); в корках выветривания железистых кварцитов — сванбергит с акцессорным бором (Макаров, 1965, 1967).

Таким образом, минералогические и геохимические данные также свидетельствуют в пользу участия гидротермальных растворов в формировании аргиллизированных зон вдоль разломов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из наших наблюдений и замеров следует, что предположение о преимущественно тектоническом — гипогенном спелеогенезе выдающихся пещер

Алтае-Саянской горной области в слабокарстующихся породах подтверждается (согласно выявленным системам разломов и трещиноватости внутри массивов и предположенным на поверхности).

Проведенные исследования рельефа пещеры Большой Орешной предполагают новые открытия. Поскольку мы уже обнаружили очень значительное удлинение пещеры в верхней части разлома Вертикаль, есть основания пытаться сделать первопрохождение, штурмуя стены других разломов, особенно с целью попасть под предвершинное плато (в западном направлении от системы Сибирской) из глубин пещеры, так как с поверхности это не представляется возможным.

Последние тектоно-геоморфологические исследования Баджейского района Манского прогиба показывают огромный нетронутый потенциал изучения рельефа пещер этого весьма перспективного района: предполагаются первопрохождения новых пещерных систем к С, СВ и Ю от пещеры Дудинской, к С и З от пещеры Баджейской.

В пещере Кёк-Таш (рис. 10) надеемся осуществить открытие новой системы вдоль предполагаемого разлома 2 в районе галереи Морской проспект, которая коррелируется с разломом 1. Линия разлома 2 пока не имеет привязки к пещере. Надежду вселяет факт, что направление разлома 2' было предсказано с дневной поверхности задолго (Boulytchov, 1999) до его обнаружения в пещере. Как подтверждение, в экспедиции 2016 г. был окончательно расширен узкий проход из завала грота Хаос, выводящий в систему Кричащий — Севастопольская, основное направление которой совпадает с линией разлома 2' (Атлас пещер..., 2019). Полагаем, что пещера Кёк-Таш мало исследована, и объемы полостей, по нашим ожиданиям, могут превысить пещеру Алтайскую.

В сложной вертикальной части разреза пещеры Алтайской (Булычов, 2019), по-видимому, еще несколько труб из глубин могут подходить близко к поверхности: мы не завершили все восхождения, поэтому, как видно из структуры пещеры ("коробчатой" морфологии), ее генезис не соответствует классическому представлению об эпикарсте (Климчук, 2009).

Некоторые восходящие тупиковые купольные формы на втором уровне в пещере Алтайской, как мы полагали, имеют высокотемпературное гидротермокарстовое (субаэральное — испарительно-конденсационное) происхождение (Дублянский, 1987), но доказательств этому не было найдено: по-видимому, эти формы можно было бы объяснить процессом

гипогенного спелеогенеза (Klimchouk, 2007), в котором рассматривается, однако, карстогенез в гипсах и известняках. В плотных мраморизованных известняках пещер Алтайской и Кёк-Таш были обнаружены признаки процесса аргиллизации и значительные отложения тонкодисперсной глины (на втором уровне), не вынесенной вадозными водами. Мы считаем важным роль феномена аргиллизации в спелеогенезе в слабокарстующихся породах в связи со сложным геологическим строением района (изверженные породы, глубинные разломы).

Механизм образования крупных полостей в слабокарстующихся породах состоит в метасоматическом преобразовании породы в аргиллиты под воздействием низкотемпературных слабокислотных растворов и углекислых эманаций, распространяющихся из недр по новейшим разломам, с последующим смещением с вадозными водами и в окончательной стадии — выносом глинистой компоненты в сторону разгрузки пещеры.

Изучение процесса аргиллизации имеет практическое значение: в глинистых породах метасоматического выщелачивания могут содержаться редкометалльные минералы (ниобийсодержащий рутил и гематит); на контактах с известняками часто образуются древние никеленосные коры выветривания (Разумова, 1977).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В спелеогенезе крупнейших пещер Алтае-Саянской складчатой области в слабокарстующихся породах первостепенным фактором является тектоника массива и приуроченные к ней гипогенные процессы. Несомненно, важными являются литология, геоморфологическое расположение, движение вод, но развитие значительного рельефа пещер в таких породах определяется в первую очередь системами трещиноватости и разломными дислокациями, сопровождаемыми гипогенными процессами.

Нами предложен механизм формирования полостей, основанный на процессе аргиллизации вдоль тектонических разломов с последующим механическим выносом глинистой компоненты вадозными водами в направлении разгрузки пещер. Процесс аргиллизации ответственен за формирование значительных полостей решетчато-коробчатой морфологии, что согласуется с результатами исследований гипогенного процесса (Klimchouk, 2007). Входы в пещеры вскрыты раскопками и разбором завалов, но большинство значительных полостей остаются недоступными для спелеологов.

Для выявления тектонических разломов нужна лазерная подземная инструментальная топографическая съемка и применение современных компьютерных программ для визуализации картографирования пещер. Корреляция сети разломов с картой пещеры дает возможность прогнозирования и открытия значительных полостей.

Методом сейсмоэлектрического эффекта возможно обнаружение с дневной поверхности близко залегающих полостей при условии их четких границ, мощного источника упругих волн и выверенной расстановки приемных электродов для вычитания регулярных помех.

В слабокарстующихся породах (конгломератах, мраморизованных известняках) Алтае-Саянской горной области в зонах новейших разломов следует ожидать открытия новых крупных пещер.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность научному руководителю И. С. Новикову (Институт геологии и минералогии имени академика В. С. Соболева СО РАН) за помощь в выполнении работы и за идеи в постановке полевых наблюдений. Отдельная благодарность Артему Баринову и Красноярскому клубу спелеологов за помощь в проведении структурно-тектонического анализа Баджейского массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Апродов В. А. (1952). Геологическое картирование. М.: Госгеоллиздат. 371 с.
- Атлас пещер России. (2019). Под ред. А. Л. Шелепина, Б. А. Вахрушева, А. А. Гунько и др. М.: РГО, РСС. 768 с.
- Булычев А. А. (1990). Крупнейшие пещеры Горного Алтая. В сб.: *Пещеры*. Вып. 22. Пермь: ПГУ. С. 140.
- Булычев А. А. (2019). Многогранная подготовка спортивного спелеотуриста. В сб.: *Пещеры*. Вып. 42. Пермь: ПГУ. С. 101—110.
- Волостных Г. Т. (1972). Аргиллизация и оруденение. М.: Недра. 240 с.
- Гвоздецкий Н. А. (1954). Карст. Вопросы общего и регионального карстоведения. М.: Географгиз. 352 с.
- Геологическая карта западной части Алтае-Саянской горной области. (1977). Под ред. В. И. Коновалова, В. И. Зиновьева, А. В. Пешковой. Л.: Аэрогеология. 6 л.
- Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000, серия Восточно-Саянская, лист N-46-X. Объяснительная записка. (1962). Под ред. А. А. Предтеченского. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 80 с.
- Гинзбург И. И. (1963). Типы древних кор выветривания, форма их проявления и классификация. В сб.: *Кора выветривания*. Вып. 6. М.: АН СССР. С. 71—101.

- Дублянский Ю. В. (1987). Геологические условия формирования и моделирование гидротермокарста. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГиГ СОАН СССР. 185 с.
- Зверева Е. А., Писемский Г. В. (1969). Кора выветривания на массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатов. *Серия Геология месторождений редких элементов*. Вып. 34. М.: Недра. 203 с.
- Каждан А. Б., Гуськов О. И. (1990). Математические методы в геологии. Учебник для вузов. М.: Недра. 251 с.
- Казицин Ю. В. (1979). Метасоматизм в земной коре. Л.: Недра. 208 с.
- Катаев В. Н. (1999). Теория и методология структурно-тектонического анализа в карстоведении. Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Пермь: ПГУ. 451 с.
- Климчук А. Б. (2009). Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. Симферополь: Сонат. 112 с.
- Корин И. З. (1960). Роль трещинных структур в формировании месторождений гипергенного генезиса. В сб.: *Проблемы тектонофизики*. М.: Госгеолтехиздат. С. 162—167.
- Макаров В. Н. (1965). Минералогия осадочных руд Яковлевского месторождения КМА и особенности их хлоритизации. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Днепропетровск: Днепропетровский горный институт имени Артема. 19 с.
- Макаров В. Н. (1967). Минерал из группы сванбергита в коре выветривания Яковлевского месторождения КМА. В сб.: *Записки Всесоюзного минералогического общества*. Т. 96. Вып. 3. С. 342—345.
- Максимов Г. М. (1993а). Карст и пещеры центра Горного Алтая. В сб.: *Свет. Вестник Киевского Карстолого-спелеологического Центра*. № 4 (10). С. 20—22.
- Максимов Г. М. (1993б). Крупнейшие пещеры и шахты Алтая (Восточная Сибирь). В сб.: *Свет. Вестник Киевского карстолого-спелеологического центра*. № 4 (10). С. 13—19.
- Максимович Г. А. (1963). Основы карстоведения. Т. 1. Пермь: Пермское книжное изд-во. 446 с.
- Маринин А. М. (1990). Карст и пещеры Алтая: учебно-краеведческое пособие. Новосибирск: НГПИ. 148 с.
- Мейер Ч., Хемли Д. (1970). Околорудные изменения вмещающих пород. В сб.: *Геохимия гидротермальных рудных месторождений*. М.: Мир. С. 148—210.
- Михайлов Н. И. (1961). Горы Южной Сибири. М.: Географгиз. 243 с.
- Мягков В. Ф. (1984). Математические методы в геологии. Методическая разработка. Свердловск: Свердловский горный институт. 44 с.
- Новиков И. С. (1998). Роль тектоники в эволюции рельефа Горного Алтая. *Геоморфология*. № 1. С. 82—91.
- Новиков И. С., Дядьков П. Г., Козлова М. П. и др. (2014). Неотектоника и сейсмичность западной части Алтае-Саянской горной области, Джунгарской впадины и Китайского Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. Т. 55. № 12. С. 1802—1814.
- Новиков И. С., Жимулев Ф. И., Ветров Е. В. и др. (2019). Геологическая история и рельеф северо-западной части Алтае-Саянской области в мезозое и кайнозое. *Геология и геофизика*. Т. 60. № 7. С. 988—1003. <https://doi.org/10.15372/RGG2019054>
- Разумова В. Н. (1977). Древние коры выветривания и гидротермальный процесс: М.: Наука. 156 с.
- Разумова В. Н., Херасков Н. П. (1963). Геологические типы кор выветривания и закономерности их размещения. В сб.: *Геологические типы кор выветривания и примеры их распространения на Южном Урале. Труды ГИН АН СССР*. Вып. 77. М.: Наука. С. 5—34.
- Расулов Ш. К. (1967). Петрография гранитоидных пород Зиаэтинских гор и их продуктов коры выветривания. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Ташкент. 26 с.
- Ташилкин В. А. (1969). Коры выветривания Приморья. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ. 24 с.
- Токарев В. Н., Юрьев А. А., Косякова Л. Н., Глаас Г. А. (2019). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-45-XXI (Прокопьевск). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 210 с.
- Фурман И. Я. (1957). К проблеме геохимии углерода. В сб.: *Труды Воронежского университета*. Т. 58. С. 59—66.
- Херасков Н. П. (1958). Роль тектоники в изучении закономерностей размещения различных полезных ископаемых в земной коре. В сб.: *Закономерности размещения полезных ископаемых*. Т. 1. М.: АН СССР. С. 14—91.
- Херасков Н. П. (1963). Некоторые общие закономерности в строении и развитии структуры земной коры. М.: АН СССР. 122 с.
- Цыкин Р. А. (1985). Отложения и полезные ископаемые карста. Новосибирск: Наука. 165 с.
- Цыкин Р. А. (1990). Карст Сибири. Красноярск: КГУ. 154 с.
- Шахов Ф. Н. (1964). Геология жильных месторождений. М.: Наука. 244 с.
- Boulytchov A. A. (1999). Kektash — the deepest cave of Siberia and Big Oreshnaya — the longest one. Stalactite. Bern, Switzerland. № 49. 1. P. 47—48.
- Boulytchov A. A. (2000). Seismic-electric effect method on guided and reflected waves. *Physics and Chemistry of the Earth. J. of EGS*. Oxford-Amsterdam: Elsevier. V. 25. № 4. P. 333—336.
- Bulychov A. A., Sorokina T. V. (2017). Multi-faceted training of caver-explorer. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 1. P. 278—284.
- Cardarelli E., Cercato M., Cerreto A. et al. (2010). Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting*. V. 58. № 4. P. 685—695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>.
- Ford D., Williams P. (2007). Karst geomorphology and hydrogeology. England: Chichester. 562p.
- Golicz M. (2017). Caveink — a set of Inkscape extensions for drawing cave maps. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 2. P. 111—115.
- Hellstrom J. (2017). Three-dimensional cave mapping using Structure from Motion. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 2. P. 116.

- Kempe S., Bauer I. (2017). 3D-imaging as a tool to understand speleogenetic processes. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 2. P. 117—121.
- Klimchouk A. B. (2007). Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective. *National Cave and Karst Research Institute*. Special paper № 1. Carlsbad. 106 p.
- Lipar M., Ferk M. (2022). Fluviokarst on Quaternary eogenetic conglomerates; an example from Slovenia. *Proceedings of the 18th International Congress of Speleology*. Savoie Mont-Blanc, France. V. 4. Geomorphology. P. 57—60.
- Lovering T. S., Shepard A. O. (1960). Hydrothermal argillic alteration on the Helen Claim, East District, Utah. *Clays and clay minerals*. 8th Nat. Conference. Pergamon Press. P. 40—52.
- Mikhailov O. V., Haartsen M. W., Toksoz M. N. (1997). Electro seismic investigation of the shallow subsurface: field measurements and numerical modeling. *Geophysics*. 62. № 1. P. 97—105.
- Mitchell E. J., Mitchell J. N. (2017). Comparison of shallow geophysical cave detection methods to 3D Lidar mapping. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 2. P. 126—129.
- Novikov I. S., Sokol E. V. (2007). Combustion metamorphic events as age markers of orogenic movements in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*. V. 23. № 7. P. 1561—1572. [https://doi.org/10000-0569/2007/023\(07\)-1561-72](https://doi.org/10000-0569/2007/023(07)-1561-72)
- Quinif Y., Verheyden S. (2022). Ghost-rock karstification. *Proceedings of the 18th International Congress of Speleology*. Savoie Mont-Blanc, France. V. 4. Geomorphology. P. 227—230.
- Sorokina T. V., Boulytchov A. A. (2001). Seismic-electric benchmarking of shallow subsurface horizons and dome cavities. *Proceedings of the International Conference of EAGE*. Amsterdam, Netherlands. V. 2. P. 133—136.

CAVES IN SLIGHTLY KARSTIC ROCKS OF ALTAI-SAYAN MOUNTAIN REGION: FORMATION MECHANISM AND MORPHOLOGY¹

A. A. Bulychov^{a, #}

^a Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of SB RAS, Novosibirsk, Russia

[#] E-mail: bulychovanatoli@yandex.ru

In addition to numerous underground cavities associated with the processes of dissolution of carbonate rocks, within the Altai-Sayan mountain region there are a number of caves developed in non-karstic and slightly karstic rocks. Among them, the caves of the conglomerate Narva rock mass of the Badzheiskii massif (Eastern Sayan, Manskii trough) stand out due to their size. The most outstanding caves here are Big Oreshnaya, Dudinskaya and Badzheiskaya, the length is more than 50 km, 35 km and 10 km respectively. The limestones of the middle Altai mountains are often in contact with effusive and intrusive rocks and are altered within the contact zones of metamorphism to dense marbleized rocks, which makes it impossible for karst processes to occur. Nevertheless, in the marbled Lower Cambrian limestones of the Kayanchinskaya suite of the Altai Mountains, large Altaiskaya and Kek-Tash caves with a total length of 4.7 and 3.2 km, respectively, are developed.

Detailed mapping of the caves was carried out, which showed their close spatial connection with the systems of the latest faults. In caves along fault zones, signs of widespread argillization were found (changes in the original substance by hydrothermal processes and its replacement by newly formed clayey minerals). The mechanism we propose for the formation of caves in non-karstic and slightly karstic rocks comes down to the removal by groundwater of a substrate argillized by hydrothermal processes along fault zones without significant participation of dissolution (karst processes). This makes this mechanism some similar to the well-known process of “clay karst” associated with suffusion in clayey rocks. The difference comes down to the development of the forms and processes we studied in argillitized fault zones, and not in clayey strata.

Keywords: speleogenesis, fracturing density, structural analysis, faults, near-fault argillization, digital mapping, seismic-electric measurements

ACKNOWLEDGMENTS

The author expresses a gratitude to scientific supervisor I. S. Novikov (V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of SB RAS) for his help in carrying out

the work and for ideas in setting up field observations. Special thanks to Artem Barinov and the Krasnoyarsk Speleologists Club for their help in carrying out a structural-tectonic analysis of the Badzheysky massif.

¹ For citation: Bulychov A. A. (2024). Caves in slightly karstic rocks of Altai-Sayan mountain region: formation mechanism and morphology. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 2. P. 108—125. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924020057>; <https://elibrary.ru/PNWOME>

REFERENCES

- Aprodov V. A. (1952). *Geologicheskoe kartirovanie* (Geological mapping). Moscow: Gosgeol. (Publ.). 371 p. (in Russ.)
- Boulytchov A. A. (1999). Kektash — the deepest cave of Siberia and Big Oreshnaya — the longest one. Stalactite, Bern, Switzerland. № 49. 1. P. 47—48.
- Boulytchov A. A. (2000). Seismic-electric effect method on guided and reflected waves. *Physics and Chemistry of the Earth. J. of EGS*. Oxford-Amsterdam: Elsevier. V. 25. № 4. P. 333—336.
- Bulychov A. A. (1990). The largest caves in the Altai Mountains. In: *Peshchery*. Iss. 22. Perm: PGU (Publ.). P. 140. (in Russ.)
- Bulychov A. A. (2019). Multifaceted training of a sports speleo tourist. In: *Peshchery*. Iss. 42. Perm: PGU (Publ.). P. 101—110. (in Russ.)
- Bulychov A. A., Sorokina T. V. (2017). Multi-faceted training of caver-explorer. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 1. P. 278—284.
- Cardarelli E., Cercato M., Cerreto A. et al. (2010). Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting*. V. 58. № 4. P. 685—695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>.
- Dublyanskii Yu. V. (1987). *Geologicheskie usloviya formirovaniya i modelirovanie gidrotermokarsta* (Geological conditions of formation and modeling of hydrothermocarst). PhD diss. Novosibirsk: IGiG SOAN SSSR. 185 p. (in Russ.)
- Ford D., Williams P. (2007). *Karst geomorphology and hydrogeology*. England: Chichester. 562 p.
- Furman I. Ya. (1957). K probleme geokhimii ugleroda (On the problem of carbon geochemistry). *Trudy Voronezhskogo Universiteta*. V. 58. P. 59—66. (in Russ.)
- Ginzburg I. I. (1963). Tipy drevnikh kor vyvetrivanii, form ikh proyavleniya i klassifikatsiya (Types of ancient weathering crusts, form of their manifestation and classification). *Kora vyvetrivanii*. Vyp. 6. M.: AN SSSR. P. 71—101. (in Russ.)
- Golicz M. (2017). Caveink — a set of Inkscape extensions for drawing cave maps. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 2. P. 111—115.
- Gvozdet'skii N. A. (1954). *Karst. Voprosy obshchego i regionalnogo karstovedeniya* (Karst. Issues of general and regional karst studies). Moscow: Geographgiz (Publ.). 352 p. (in Russ.)
- Hellstrom J. (2017). Three-dimensional cave mapping using Structure from Motion. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 2. P. 116.
- Kataev V. N. (1999). *Teoriya i metodologiya strukturno-tektonicheskogo analiza v karstovedenii* (Theory and methodology of structural-tectonic analysis in karst studies). Ph D. diss. Perm: PGU. 451 p. (in Russ.)
- Kazhdan A. B., Guskov O. I. (1990). *Matematicheskie metody v geologii*. Uchebnik dlya vuzov (Mathematical methods in geology. Textbook for universities). Moscow: Nedra (Publ.). 251 p. (in Russ.)
- Kazhitsyn Yu. V. (1979). *Metasomatizm v zhemnoi kore* (Metasomatism in the earth's crust). Leningrad: Nedra (Publ.). 208 p. (in Russ.)
- Kempe S., Bauer I. (2017). 3D-imaging as a tool to understand speleogenetic processes. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 2. P. 117—121.
- Kheraskov N. P. (1958). Rol' tektoniki v izuchenii zakonomernosti razmeshcheniya razlichnykh poleznykh iskopaemykh v zemnoi kore. (The role of tectonics in the study of the regularities of displacing various minerals in the earth's crust). *Zhakovskoye razmeshcheniya poleznykh iskopaemykh*. V. 1. Moscow: AN SSSR (Publ.). P. 14—91. (in Russ.)
- Kheraskov N. P. (1963). *Nekotorye obshchie zakonomernosti v stroenii i razvitii struktury zemnoi kory* (Some general patterns in the structure and development of the earth's crust). Moscow: AN SSSR (Publ.). 122 p. (in Russ.)
- Khorin I. Z. (1960). Rol' treshchinnykh struktur v formirovaniy mestorozhdenii gipergennogo genezisa (The role of fracture structures in the formation of hypergene genesis deposits). *Problemy tektonofiziki*. Moscow: Gosgeoltekhizdat (Publ.). P. 162—167. (in Russ.)
- Klimchouk A. B. (2007). Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective. *National Cave and Karst Research Institute*. Special paper № 1. Carlsbad. 106 p.
- Klimchuk A. B. (2009). *Epikarst: gidrogeologiya, morfogenez i evolyutsiya* (Epikarst: hydrogeology, morphogenesis and evolution). Simferopol: Sonat (Publ.). 112 p. (in Russ.)
- Lipar M., Ferk M. (2022). Fluviokarst on Quaternary eogenetic conglomerates; an example from Slovenia. *Proceedings of the 18th International Congress of Speleology*. Savoie Mont-Blanc, France. V. 4. Geomorphology. P. 57—60.
- Lovering T. S., Shepard A. O. (1960). Hydrothermal argillic alteration on the Helen Claim, East District, Utah. *Clays and clay minerals. 8th Nat. Conference*. Pergamon Press. P. 40—52.
- Makarov V. N. (1965). Mineralogiya osadochnykh rud Yakovlevskogo mestorozhdeniya KMA i osobennosti ikh khloritizatsii (The mineralogy of sedimentary ores of the Yakovlevsky deposit of KMA and the features of their chloritization). PhD thesis. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovskii gornyi institute imeni Artema. 19 p. (in Russ.)
- Makarov V. N. (1967). Mineral iz gruppy svanbergita v kore vyvetrivanii Yakovlevskogo mestorozhdeniya KMA (Mineral from the svanbergite group in the weathering crust of the Yakovlevskoe deposit of KMA). *Zhapiski Vsesoyuzhnogo mineralogicheskogo obshchestva*. V. 96. Iss. 3. P. 342—345. (in Russ.)
- Maksimov G. M. (1993a). Karst i peshchery centra Gornogo Altaya (Karst and caves of the center of Mountain Altai). *Svet: Vestnik Kievskogo Karstologo-speleologicheskogo tsentra*. № 4 (10). P. 20—22. (in Russ.)
- Maksimov G. M. (1993b). Krupneishie peshchery i shakhty Altaya (Vostochnaya Sibir) (The largest caves and shafts of Altai (Eastern Siberia)). *Svet: Vestnik Kievskogo Karstologo-speleologicheskogo tsentra*. № 4 (10). P. 13—19. (in Russ.)

- Maksimovich G. A. (1963). *Osnovy karstovedeniya* (Principles of karst science). V. 1. Perm: Perm book publishing house (Publ.). 446 p. (in Russ.)
- Marinin A. M. (1990). *Karst i peshchery Altaya: Uchebno-kraevedcheskoe posobie* (Karst and caves of Altai: local history tutorial). Novosibirsk: NGPI (Publ.). 148 p. (in Russ.)
- Meier Ch., Khemli D. (1970). Okolorudnye izmeneniya vmeshchayushchikh porod (Wall-mounted changes in host rocks). *Geokhimiya gidrotermalnykh rudnykh mestorozhdenii*. Moscow: Mir (Publ.). P. 148–210. (in Russ.)
- Mikhailov N. I. (1961). *Gory Yuznoi Sibiri* (Mountains of Southern Siberia). Moscow: *Geographgiz* (Publ.). 243 p. (in Russ.)
- Mikhailov O. V., Haartsen M. W., Toksoz M. N. (1997). Electrostatic investigation of the shallow subsurface: field measurements and numerical modeling. *Geophysics*. 62. № 1. P. 97–105.
- Mitchell E. J., Mitchell J. N. (2017). Comparison of shallow geophysical cave detection methods to 3D Lidar mapping. *Proceedings of the 17th International Congress of Speleology*. Sydney, Australia. V. 2. P. 126–129.
- Myagkov V. F. (1984). Matematicheskie metody v geologii. Metodicheskaya razrabotka (Mathematical methods in geology. Methodical working-out). Sverdlovsk: SGI (Publ.). 44 p. (in Russ.)
- Novikov I. S. (1998). Rol' tektoniki v evolyutsii rel'efa Gornogo Altaya (The role of tectonics in the evolution of the relief of Mountainous Altai). *Geomorfologiya*. № 1. P. 82–91. (in Russ.)
- Novikov I. S., Dyadkov P. G., Kozlova M. P. et al. (2014). Recent tectonics and seismicity of the western Altai–Sayan mountainous region, Junggar basin, and Chinese Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*. V. 55. № 12. P. 1441–1451.
- Novikov I. S., Sokol E. V. (2007). Combustion metamorphic events as age markers of orogenic movements in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*. V. 23. № 7. P. 1561–1572. [https://doi.org/10.1000-0569/2007/023\(07\)-1561-72](https://doi.org/10.1000-0569/2007/023(07)-1561-72)
- Novikov I. S., Zhimulev F. I., Vetrov E. V. et al. (2019). Mesozoic and Cenozoic Geologic History and Surface Topography of the Northwestern Altai-Sayan Area. *Russian Geology and Geophysics*. V. 60. № 7. P. 781–792. <https://doi.org/10.15372/RGG2019054>
- Predtechenskii A. A. (Ed.). (1962). *Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000, seriya Vostochno-Sayanskaya, list N-46-X. Ob'yasnitel'naya zapiska* (Geological map of USSR of 1:200000 scale, East-Sayan seria, list N-46-X. Explanation message). M.: Gosgeoltekhizdat (Publ.). 80 p. (in Russ.)
- Quinif Y., Verheyden S. (2022). Ghost-rock karstification. *Proceedings of the 18th International Congress of Speleology*. Savoie Mont-Blanc, France. V. 4. Geomorphology. P. 227–230.
- Rasulov Sh. K. (1967). *Petrografiya granitoidnykh porod Zhiatdinskikh gor i ikh produktov kory vyvetrivaniya* (Petrography of granitoid rocks of the Ziaetda Mountains and their weathering crust products). PhD thesis. Tashkent. 26 p. (in Russ.)
- Razumova V. N. (1977). *Drevnie kory vyvetrivaniya i gidrotermal'nyi protsess* (Ancient weathering crusts and the hydrothermal process). M.: Nauka (Publ.). 156 p. (in Russ.)
- Razumova V. N., Kheraskov N. P. (1963). *Geologicheskie tipy kor vyvetrivaniya i zakonovernosti ikh razmeshcheniya* (Geological types of weathering crusts and patterns of their placement). *Geologicheskie tipy kor vyvetrivaniya i primery ikh rasprostraneniya na Yuzhnom Urale*. Moscow: Nauka (Publ.). (Trudy GIN AN SSSR, vyp. 77). P. 5–34. (in Russ.)
- Shakhov F. N. (1964). *Geologiya zhil'nykh mestorozhdenii* (Geology of vein deposits). Moscow: Nauka (Publ.). 244 p. (in Russ.)
- Shelepin A. L. (Ed.), Vakhrushev B. A., Gunko A. A. et al. (2019). *Atlas peshcher Rossii* (Atlas of caves of Russia). Moscow: RGO, RSS (Publ.). 768 p. (in Russ.)
- Sorokina T. V., Boulytchov A. A. (2001). Seismic-electric benchmarking of shallow subsurface horizons and dome cavities. *Proceedings of the International Conference of EAGE*. Amsterdam, Netherlands. V. 2. P. 133–136.
- Tashchilkin V. A. (1969). *Kory vyvetrivaniya Primoriya* (Weathering crusts of Primorye). PhD thesis. Moscow. 24 p. (in Russ.)
- Tokarev V. N., Yuriev A. A., Kosyakova L. N., Glaas G. A. (2019). *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200000. Izhdanie vtoroe. Seriya Kuzbasskaya. List N-45-XXI (Prokopyevsk). Ob'yasnitel'naya zapiska* (State Geological map of Russian Federation of 1:200000 scale. Second issue. Kuzbass seria. List N-46-X. Explanation message). S-Pb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI (Publ.). 210 p. (in Russ.)
- Tsykin R. A. (1985). *Otlozheniya i poleznye iskopaemye karsta* (Deposits and mineral resources of karst). Novosibirsk: Nauka (Publ.). 165 p. (in Russ.)
- Tsykin R. A. (1990). *Karst Sibiri* (Karst of Siberia). Krasnoyarsk: KGU (Publ.). 154 p. (in Russ.)
- Volostnykh G. T. (1972). *Argillizatsiya i orudnenie* (Argillization and mineralization). M.: Nedra (Publ.). 240 p. (in Russ.)
- Zhvereva E. A., Pisemskii G. V. (1969). *Kora vyvetrivaniya na massivakh ul'traosnovnykh shchelochnykh porod i karbonatitov* (Weathering crust on massifs of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites). *Seriya Geologiya mestorozhdenii redkikh elementov*. Iss. 34. M.: Nedra (Publ.). 203 p. (in Russ.)
- Zinoviev V. I., Peshkova A. V., Konovalov V. I. (Ed.). (1977). *Geologicheskaya karta zapadnoi chasti Altae-Sayanskoi gornoj oblasti* (Geological map of the western part of the Altai-Sayan mountain region). Leningrad: Aerogeologiya (Publ.). 6 p. (in Russ.)