

УДК 551.44

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СЕРНОКИСЛОГО СПЕЛЕОГЕНЕЗА В УЗБЕКИСТАНЕ (СРЕДНЯЯ АЗИЯ)

© 2024 г. Е. П. Базарова<sup>1\*</sup>, О. И. Кадебская<sup>2</sup>, Е. А. Цурихин<sup>3</sup>, А. М. Кононов<sup>1,4</sup>

Представлено академиком РАН А.А. Баряхом 18.02.2024 г.

Поступило 18.02.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принято к публикации 26.03.2024 г.

На территории Узбекистана исследована пещера, образованная в ходе процесса сернокислого спелеогенеза. Доказательства сернокислого спелеогенеза включают: характерную морфологию подземной полости, широкое развитие восходящих ходов, наличие источника тёплых подземных вод с напорным типом разгрузки и специфическим сероводородным хлоридно-сульфатным натриево-кальциевым химическим составом, присутствие бактериальных матов в водотоках и набор характерных вторичных минералов. По химическому и изотопному составу кислорода и водорода вод источника сделан вывод о том, что подземные воды изученной пещеры являются результатом смешения инфильтрационных пресных вод с седиментогенными водами морского происхождения, а также имеют следы процесса взаимодействия в системе “вода–порода”. Пещера представляет собой пример активного сернокислого спелеогенеза и является первым описанным проявлением сернокислого спелеогенеза в Узбекистане.

*Ключевые слова:* сернокислый спелеогенез, минералы, подземные воды, изотопия, Гиссарский хребет, Узбекистан

DOI: 10.31857/S2686739724070188

Процесс сернокислого спелеогенеза (SAS) является одним из проявлений гипогенного спелеогенеза — развития подземных полостей за счёт восходящего потока воды. Формирование пещер в ходе сернокислого спелеогенеза происходит вследствие растворения известняков серной кислотой, образующейся при окислении сероводорода, содержащегося в поступающих из глубинного источника водах [1]. На сегодняшний день пещеры, полностью или частично сформировавшиеся за счёт сернокислого спелеогенеза, известны на территории Италии [2], Австрии [3], США [4], Мексике [5], Румынии [6], Словакии [7], Македонии [8] и России (Чеченская Республика) [9]. На территории Узбекистана на сегодняшний момент пещер, имеющих такой генезис, не описано. Пещеры сернокислого

спелеогенеза имеют ряд признаков, таких как характерная морфология, минеральные ассоциации, состав подземных вод и присутствие бактериальных матов.

Проведённые исследования были посвящены изучению пещеры Ходжайпак, расположенной в юго-западных отрогах Гиссарского хребта на территории Узбекистана.

Пещера Ходжайпак находится у подножья хребта Сурхантау в Сурхандарьинской области Узбекистана (рис. 1). Хребет Сурхантау вытянут с юго-запада на северо-восток и имеет длину около 40 км, высшей точкой является г. Чульбаир высотой 3812 м. Для климата района характерно сухое жаркое лето и непродолжительная зима, в течение которой выпадает большая часть осадков. Хребет Сурхантау является асимметричной антиклинальной складкой, юго-восточное крыло которой осложнено Сурхантауским взбросом, а северо-западное падает под углом 10–25°. Пещера расположена в долине реки Ходжайпак на высоте 1000 м над уровнем моря и приурочена к водоносному комплексу верхнеюрских келловей-оксфордских известняков [10], нарушенных крупным разломом северо-восточного

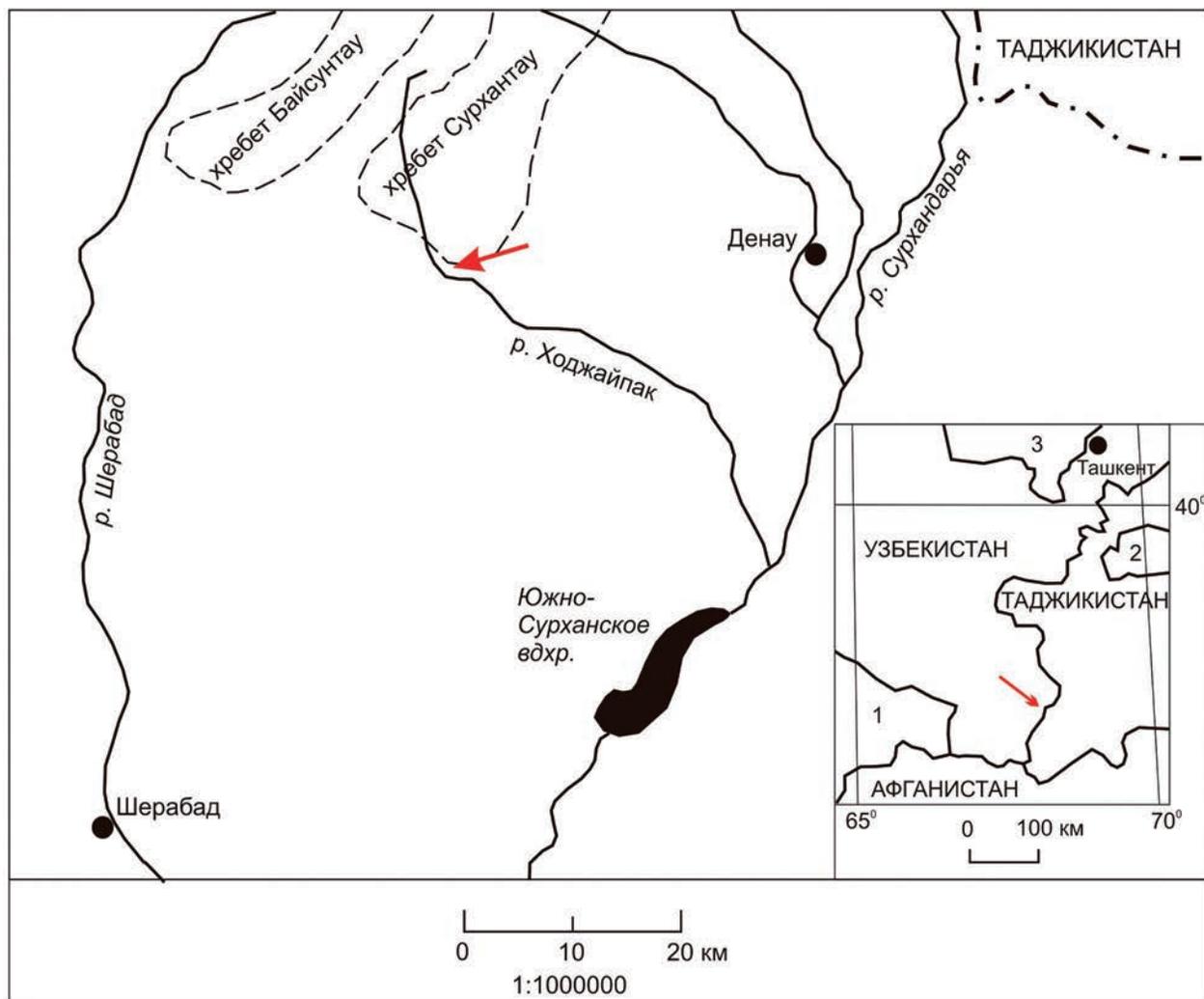
<sup>1</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Горный институт Уральского отделения Российской Академии наук, Пермь, Россия

<sup>3</sup>Уральский филиал ФГУП “Госрыбцентр”, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

\*E-mail: bazarova@crust.irk.ru



**Рис. 1.** Географическое положение пещеры Ходжайпак (указана красной стрелкой). На врезке справа цифрами отмечены Туркменистан (1), Кыргызстан (2) и Казахстан (3).

направления. Химический состав вмещающих пород приводится в табл. 1. Выше залегают отложения мелового возраста, представленные красноцветными толщами аргиллитов, известняков, алевролитов, песчаников и гипсоносных пород. Привходовая часть пещеры оборудована для посещений и забора воды для питья в лечебных целях.

Топографическая съёмка пещеры и отбор проб проводился авторами в ходе экспедиции Екатеринбургского городского клуба спелеологов (СГС) (руководитель — В.Л. Логинов) летом 2019 г. Были взяты пробы вмещающих пород, воды, вторичных отложений и бактериальных матов из водотоков. Определение минерального состава образцов проводили в ЦКП Института земной коры СО РАН в г. Иркутске методом

порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН — 3.0 (аналитик М.Н. Рубцова). Изучение химического состава и морфологии минеральных агрегатов было проведено на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа “INCA Energy” 350/X-max 20 в Горном институте УрО РАН в г. Пермь (аналитик О.В. Коротченкова). Содержание петрогенных элементов во вмещающих породах определялось методом силикатного анализа аналитиками М.М. Самойленко и Г.В. Бондаревой в ЦКП Института земной коры СО РАН. Химический состав воды определялся методами титриметрии, гравиметрии и атомно-абсорбционной спектрометрии аналитиком Л.А. Дурбан лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН. Бактериальные маты

**Таблица 1.** Химический состав пород, в которых заложена п. Ходжайпак (мас. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	0.27	0.24	0.75	0.27	0.83	1.76	0.84
TiO <sub>2</sub>	<нпо	0.02	0.02	<нпо	0.02	0.02	<нпо
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49	0.4	0.66	0.51	0.66	0.64	0.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.27	0.22	0.41	0.2	0.41	<нпо	0.74
FeO	—	—	—	—	—	—	0.11
MnO	<нпо	0.01	<нпо	<нпо	<нпо	0.01	0.01
MgO	0.47	0.45	0.46	0.43	0.44	0.5	0.42
CaO	54.71	55.42	53.58	54.57	52.43	52.8	49.21
Na <sub>2</sub> O	<нпо	<нпо	<нпо	<нпо	<нпо	<нпо	0.13
K <sub>2</sub> O	0.05	0.05	0.11	0.05	0.12	0.09	0.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<нпо	<нпо	<нпо	<нпо	<нпо	<нпо	<нпо
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.3	0.15	0.12	0.6	1.38	1.07	3.46
ппп	1.28	1.78	1.23	1.61	2.21	1.47	1.61
CO <sub>2</sub>	41.42	41.03	39.05	40.18	37.68	38.89	33.61
SO <sub>3</sub>	0.9	0.08	2.18	1.62	3.59	2.99	8.53
Сумма	100.15	99.85	99.57	100.03	99.76	100.24	99.61

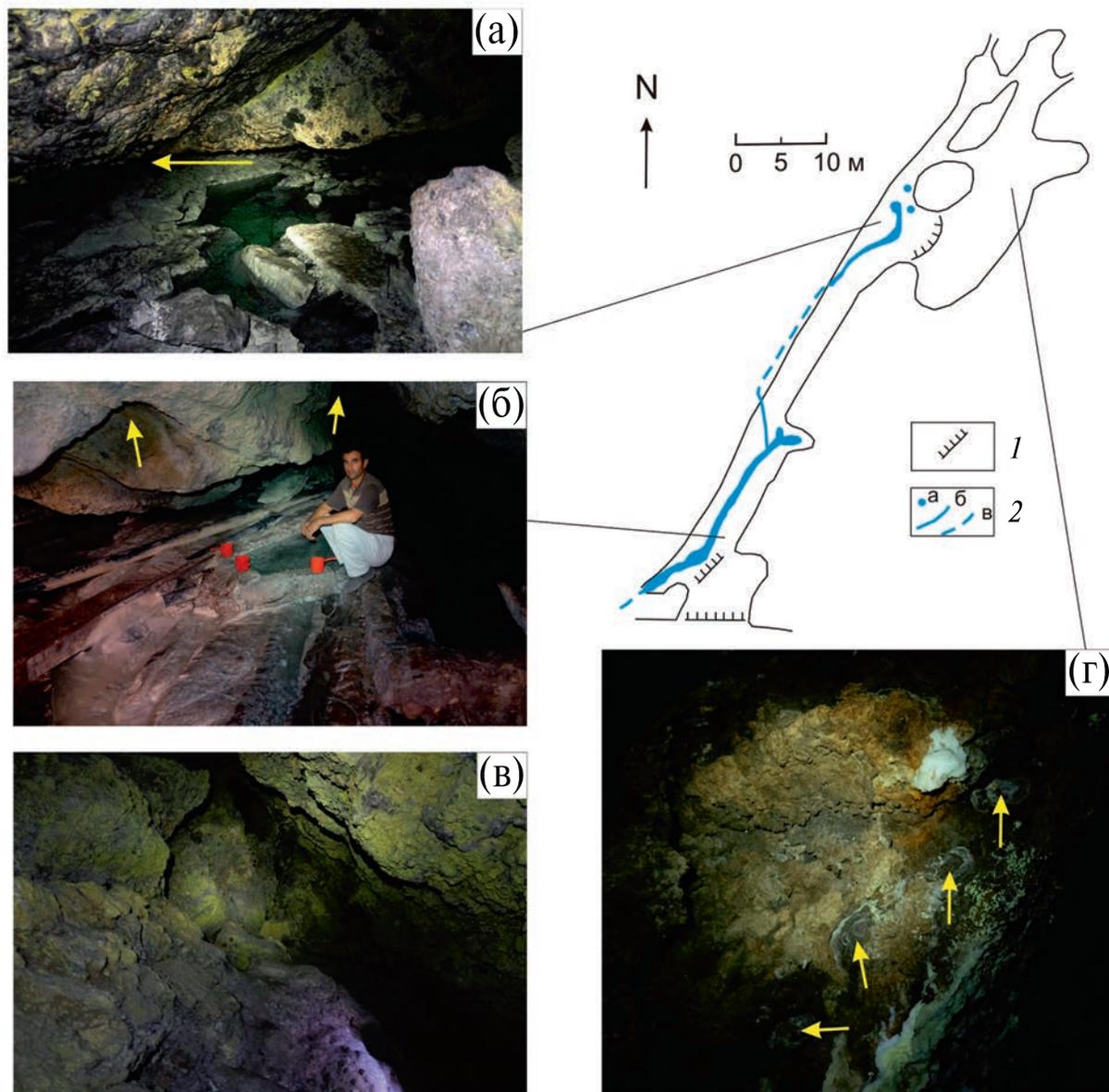
Примечание. Вмещающие известняки малоизмененные (1–5), с био пленками (6), с зелеными налетами и ожелезнением (7). <нпо – содержание компонентов ниже предела обнаружения, прочерк – компонент не определялся. Пределы обнаружения петрогенных окислов (мас. %): TiO<sub>2</sub> – 0.02, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.25, MnO – 0.01, K<sub>2</sub>O – 0.01, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.2, FeO – 0.02, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.03, H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> – 0.01, потери при прокаливании (ппп) – 0.02.

были исследованы при помощи сканирующего электронного микроскопа CAMSCAN в МГУ им. Ломоносова в г. Москва после фиксации методом замораживания в изопропане и криогенной сушки. Выделение культур сероокисляющих бактерий проводили на среде Видделя и Пффенига, pH 7.0 [11], использовали жидкие и агарозные среды. Изотопный анализ кислорода и водорода проводился в Инсбрукском университете (Австрия) на анализаторе L-2130-i (“Picarro”, США) под руководством Ю.В. Дублянского. Результаты нормализовались относительно стандарта V-SMOW. Средняя точность измерений δ<sup>18</sup>O составила ±0,1‰, δ<sup>2</sup>H – ±0,4‰. Изотопный состав серы определяли в лаборатории геохимии и геохронологии ГИН РАН.

По данным выполненной в 2019 г. топографической съёмки, длина пещеры составляет 150 м. Подземная полость представляет собой галерею северо-восточного направления шириной 1–5 м с несколькими расширениями (рис. 2), по дну которой протекает ручей. К характерным морфологическим особенностям пещер SAS относятся центральная зона, состоящая из камер неправильной формы с локальными пересекающимися их трещинами и карманами растворения [1], от основных зон развития пещеры спускаются узкие трещины, в активных пещерах являющиеся питающими каналами, через которые

поступает вода, содержащая сероводород. Пещера Ходжайпак состоит из центральной галереи с несколькими расширениями (рис. 2), наибольшее сечение галерея имеет на уровне воды и выше (рис. 2 а). В пещере наблюдаются такие характерные элементы, как потолочные купола (рис. 2 б) и карманы замещения (рис. 2 г). Наибольшее расширение галереи и мощные гипсовые отложения (коры на стенах и рыхлый слой на полу) наблюдаются вблизи основного питающего канала (рис. 2 в).

Наиболее распространенным вторичным минералом в п. Ходжайпак является гипс, формирование которого происходит по механизму, описанному в работе [12] в субаэральных условиях за счёт окисления сероводорода. При воздействии серной кислоты на вмещающие известняки происходит замещение известняка гипсом, образующим коры, цвет которых зависит от цвета исходного известняка (серые, рыжеватые). Изотопный состав серы в гипсах (δ<sup>34</sup>S от –3.0 до –12.8‰) сходен со значениями δ<sup>34</sup>S для вторичного гипса в пещерах гор Sellaro [2]. В верхней части гипсовых кор наблюдаются многочисленные налёты самородной серы. Известно, что сера может накапливаться в результате неполного окисления H<sub>2</sub>S при низком pH, особенно там, где кислоты локально экранированы от карбонатной породы [1]. В данном случае таким



**Рис. 2.** Схема пещеры и её морфологические особенности: выемки на стенах, образовавшиеся на границе вода-воздух при понижении уровня грунтовых вод (а); коррозионная морфология потолка пещеры над подземной рекой (коррозионные куполообразные выемки показаны стрелками) (б); общий вид пещерного хода, где видны коры замещающего гипса на стенах, а мощные рыхлые гипсовые отложения покрывают пол (зеленоватый цвет вызван налётами серы) (в); участок стены, покрытый замещающим гипсом, стрелками показаны карманы, образовавшиеся при опадании кусков гипса, видны участки белоснежного перекристаллизованного гипса и желтовато-зелёные налёты серы (г).

экраном являются гипсовые образования. Барит и целестин образуют небольшие включения в гипсовых корках и, по-видимому, были образованы за счёт повышенных концентраций Ва и Sr в отдельных слоях вмещающих известняков, переработанных в гипс под воздействием серной кислоты.

В гипсовых кристаллах были отмечены скопления очень мелких (менее 1 мкм) включений

ртутьсодержащего минерала. Точная диагностика этой минеральной фазы затруднена из-за малого размера частиц. Гипс, сера, барит и целестин весьма распространены в пещерах SAS [2, 4, 9, 13] и могут считаться типоморфными для данных пещер. Кроме вышеперечисленных минералов, в п. Ходжайпак были зафиксированы галит NaCl и тенардит Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, отложение которых, по-видимому, связано с привнесом

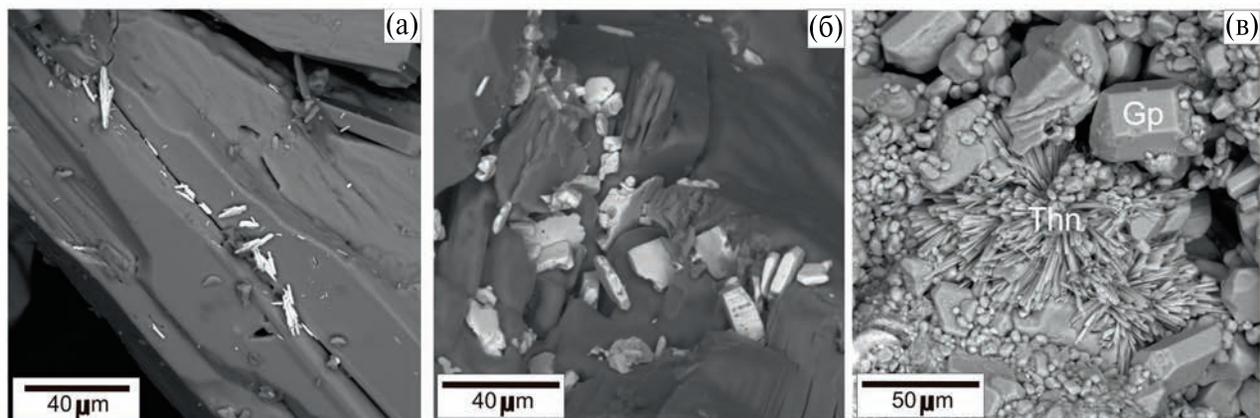


Рис. 3. Игольчатые кристаллы целестина (а) и пластинчатые кристаллы барита (б) на поверхности гипсовых кристаллов (Gp), звездообразные сростки кристаллов тенардита (Thn) среди гипсовых (Gp) кристаллов (в).

Таблица 2. Химический состав воды из п. Ходжайпак

Минерализация мг/л	pH		Содержание компонентов					HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>			
1934.07		мг/л	0.5	3.73	134.54	32.83	387.77	179.4	971.35	210.95
	7.05	мг-экв/л	0.03	0.1	5.85	2.7	19.35	2.94	20.22	5.95
		%-экв	0.1	0.34	20.88	9.63	69.05	10.1	69.46	20.44

Таблица 3. Содержание редких и редкоземельных элементов в водах восходящего источника в пещере Ходжайпак, озера в пещере Лунная и карстового источника в Большом Каньоне, мкг/дм<sup>3</sup>

Элементы	Восходящий источник в пещере Ходжайпак	Озеро в пещере Лунная	Карстовый источник в Большом каньоне
Li	68	0.5	0.5
B	215	5	5
Na	130251	1221	748
Mg	29341	1980	3565
S	331988	1411	2402
K	3059	244	319
Ca	356302	39479	41413
Mn	4.4	0.3	1.2
Fe	3.3	0.2	0.4
Br	328.1	7.0	4.9
Rb	6.3	0.2	0.2
Sr	2898.5	40.2	65.4
Cs	2.2	0.012	0.005

натрия из вышележащей толщи или почвенного слоя. Засушливый климат в данной области способствует образованию каменной соли в почве. Кремнезём, частицы которого были обнаружены в слое осыпавшегося гипса на полу пещеры, является продуктом изменения глинистой примеси в составе вмещающих известняков под

воздействием серной кислоты. Как показано в работе [14], при изменении глин под воздействием H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> обычно образуются алузит, гидратированный галлуазит, гиббсит, оксиды и гидроксиды железа и марганца, а также опал. В целом присутствие опала в известняковых пещерах

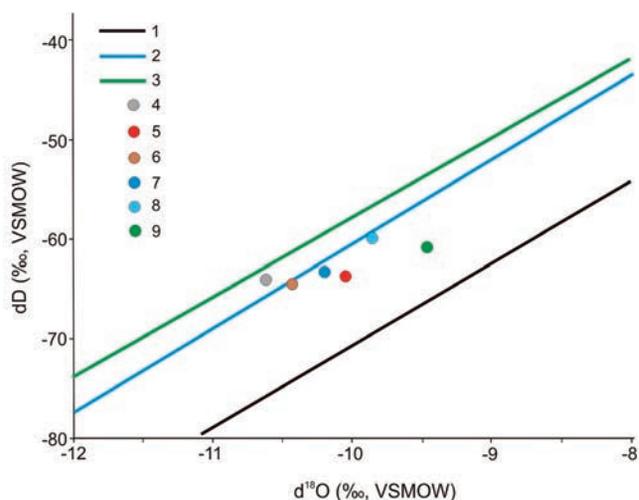
часто указывает на довольно кислые условия, типичные для сернокислых пещер [15].

В водоёмах (ручей и лужи) отмечается большое количество бактериальных нитей, образующих скопления – бактериальные маты. Высохшие маты в виде тонких хрупких кор наблюдаются в пересохших лужах, которые являются сезонными и наполняются во время подъёма уровня воды в ручье. Структура биоплёнок неоднородна, выявлены тяжи с бактериальными клетками размером до 3 мкм. Выявлены изоляты сульфатредукторов подвижных палочек, предварительно отнесённых к семейству *Desulfomicrobium*. Среди сероокисляющих бактерий выделен род *Thiobacillus*, кроме того, по морфологическим характеристикам в консорциуме выявляется присутствие ещё двух морфологических типов бактерий, однако выделить их чистые культуры не удалось. Более точная идентификация видов требует применения молекулярно-генетических методов.

Места выхода подземных вод расположены на расстоянии 25 и 60 м от входа в пещеру. Расход ручья составляет около 80 литров в секунду. Состав воды хлоридно-сульфатный натриево-кальциевый, вода тёплая, солоноватая, с нейтральным pH (общая минерализация составляет 1934 мг/л, pH 7.05) и наличием сероводорода до 2.77 мг/л (табл. 2). В пещере ощущается сильный запах сероводорода, который слабеет в привходовой части.

Отличительной особенностью подземных вод п. Ходжайпак в сравнении с водами других пещер района (табл. 3), являются высокие концентрации микрокомпонентов (мкг/дм<sup>3</sup>): Li (68), B (215), Br (328), Rb (6.3), Sr (2898), Cs (2.18), специфичных для вод седиментогенного происхождения. Характеристические коэффициенты Cl/Br и гNa/гCl, составляющие 643 и 0.98 соответственно, говорят об участии седиментогенных вод в формировании данного источника.

Изотопный состав кислорода и водорода подземных вод района свидетельствует о преимущественно инфильтрационном питании. Линия локальных метеорных вод находится выше линии глобальных метеорных вод, что говорит об участии снегового питания. В подземных водах источника п. Ходжайпак величины  $\delta^{18}\text{O}$  ( $-9.5\text{‰}$ ) и  $\delta\text{D}$  ( $-60.9\text{‰}$ ), немного выше, чем в водах пресных карстовых источников хребта Сурхантау. Наличие специфических компонентов в химическом составе подземных вод, характер разгрузки, температура и газовый состав говорят о более сложном процессе формирования



**Рис. 4.** Изотопный состав подземных вод района хребта Сурхантау. 1 – глобальная линия метеорных вод (GMWL) по [17], 2–3 – локальная линия метеорных вод (LMWL) (2) и метеорные воды Восточного Средиземноморья (EMWL) (3) по [18]; 4–8 – пресные карстовые воды хребта Сурхантау: 4 – источник, вытекающий из пещеры Бой-Булок, 5 – озеро в пещере Лунная, 6 – источник в Большом Каньоне, 7 – ручей в пещере имени Вишневого на глубине 200 м, 8 – капающая вода в пещере имени Вишневого на глубине 60 м; 9 – источник в пещере Ходжайпак.

вод – смешении инфильтрационных вод с седиментогенными и активных процессах взаимодействия с вмещающими породами. Это хорошо согласуется с общими гидрогеологическими условиями региона [10], широким распространением термальных сульфатных кальциевых сероводородных вод в глубокозалегающих нефтегазоносных толщах, детально изученных по данным бурения скважин в Сурхандарьинской нефтегазоносной впадине [16]. Это напорные воды, с высокой температурой и минерализацией, способные при наличии крупных разломных зон, к которым приурочены пещеры, обеспечивать вертикальные перетоки подземных вод в зону свободного водообмена, смешение и разгрузку на дневной поверхности.

Таким образом, в п. Ходжайпак отмечаются следующие признаки процесса SAS: морфологические элементы (купола, карманы замещения, питающие каналы, выемки), набор специфических вторичных минералов (гипс, самородная сера, сульфаты) и восходящий источник тёплой хлоридно-натриевой воды, содержащий сероводород. Также доводом в пользу процесса SAS можно считать большое количество бактериальных нитей (*Desulfomicrobium*, *Thiobacillus*)

в водотоке. По морфологическому строению, составу подземных вод и минеральному составу вторичных отложений пещера Ходжайпак имеет сходство с описанными ранее активными пещерами SAS. Химический состав вод источника в пещере и изотопный состав кислорода и водорода указывают на формирование данных подземных вод в ходе смешения в разломной зоне инфильтрационных пресных вод, формирующихся в карстовых полостях хребта Сурхантау, и захороненных седиментогенных вод морских осадков. Особенностью вторичных минералов п. Ходжайпак является наличие ртутисодержащего минерала, ранее не отмечавшегося в пещерах сернокислого карста. Пещера может служить полигоном для дальнейших исследований процессов сернокислого спелеогенеза, скорости его развития, влияния на вмещающие породы и процессов вторичного минералообразования, а также развития специфических микробиологических сообществ и их изучения. Как показывают исследования в пещерах Фразасси [19, 20], пещеры SAS представляют собой перспективные объекты для медицинских и астробиологических исследований. Вследствие активного роста полости за счёт процессов замещения известняка сульфатами в пещере часты обрушения гипсовых кор различной мощности, поэтому при посещении дальней необорудованной части следует соблюдать осторожность. Для территории Узбекистана пещера Ходжайпак является первым зафиксированным проявлением сернокислого спелеогенеза.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят аналитиков М.Н. Рубцову, О.В. Коротченкову, М.М. Самойленко, Г.В. Бондареву и Л.А. Дурбан за проделанный анализ.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена с использованием оборудования и инфраструктуры Центра коллективного пользования “Геодинамика и геохронология” Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук по гранту 075-15-2021-682.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Palmer A. N., Hill C. A.* Sulfuric acid caves // Book chapter in the Encyclopedia of Caves (Second edition). Edited by: W.B. White, D.C. Culver. 2012. 966 p. P. 810–819.

2. *D'Angeli I. M., Parise M., Vattano M., Madonna G., Galdenzi S., De Waele J.* Sulfuric acid caves of Italy: A review // *Geomorphology*. 2019. V. 333. P. 105–122.
3. *Waele J., Audra P., Madonna G., Vattano M., Plan L., D'Angeli I. M., Bigot J.-Y., Nobecourt J. C.* Sulfuric acid speleogenesis (SAS) close to the water table: examples from southern France, Austria, and Sicily // *Geomorphology*. 2016. V. 253. P. 452–467.
4. *Polyak V. J., Provencio P.* By-product materials related to H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> influenced speleogenesis of Carlsbad, Lechuguilla, and other caves of the Guadalupe Mountains, New Mexico // *Journal of Cave and Karst Studies*. 2001. № 63 (1). P. 23–32.
5. *Hose L. D., Pizarovicz J. A.* Cuevade Villa Luz, Tabasco, Mexico: reconnaissance study of an active sulfur spring cave and ecosystem // *Journal of Cave and Karst Studies*. 1999. № 61 (1). P. 13–21.
6. *Puscas C. M., Onac B. P., Tamas T.* The mineral assemblage of caves within Salitrari Mountain (Cerna Valley, SW Romania): depositional environment and speleogenetic implications // *Carbonates Evaporites*. 2010. № 25. P. 107–115.
7. *Bella P., Bosak P., Mikysek P., Littva J., Hercman H., Pawlak J.* Multi-phased hypogene speleogenesis in a marginal horst structure of the Male Karpaty Mountains, Slovakia // *International Journal of Speleology*. 2019. № 48 (2). P. 203–220.
8. *Temovski M., Futo I., Turi M., Palcsu L.* Sulfur and oxygen isotopes in the gypsum deposits of the Provalata sulfuric acid cave (Macedonia) // *Geomorphology*. 2018. V. 315. P. 80–90.
9. *Chervyatsova O. Y., Potapov S. S., Kuzmina L. Y., Dublyansky Y. V., Sadykov S. A., Kiseleva D. V., Okuneva T. G., Dzhabrailov S.-E. M., Samokhin G. V.* Sulfuric acid speleogenesis in the North Caucasus: Sharo-Argun valley Caves (Chechen Republic, Russia) // *Geomorphology*. 2020. V. 369. 107346.
10. *Гидрогеология СССР. Т. XXXIX. Узбекская ССР / Под ред. Мавлянова Г.А. —М., Недра, 1971. 472 с.*
11. *Кузнецов С. И., Дубинина Г. А.* Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
12. *Egemeier S. J.* Cavern development by thermal waters. 1981. *National Speleological Society Bulletin*. № 43. P. 31–51.
13. *Galdenzi S.* Barite replacement boxwork in the Frasassi caves (Italy) // *International Journal of Speleology*. 2019. № 48 (3). P. 305–310.
14. *Polyak V. J., Guven N.* Clays in caves of the Guadalupe Mountains, New Mexico // *Journal of Cave and Karst Studies*. 2000. № 62 (2). P. 120–126.

15. Hill C. A., Forti P. Cave Minerals of the World. Huntsville, Alabama, USA: National Speleological Society, 1997. 463 p.
16. Жураев М. П. Уточнение геоструктурных и гидродинамических факторов при формировании сероводородных вод в Сурхандарьинской мегасинклинали // Разведка и охрана недр. 2016. № 4. С. 37–43.
17. Craig H. Isotopic variation in meteoric water // Science. 1961. V. 133 (3465). P. 1702–1703.
18. Breitenbach S. F. M., Kwiecien O., Sauro F., Loginov V., Lu Y., Tsurikhin E., Votintseva A. Element and stable isotope aqueous geochemistry from Baysun Tau, Uzbekistan – tracing the source of the dripwater // Proceedings of the 16th International Congress of Speleology. 2013. V. 2. P. 485–488.
19. Vlasceanu L., Sarbu S. M., Summers Engel A., Kinkle B. K. Acidic, cave-wall biofilms located in the Frasassi gorge, Italy // Geomicrobiology. 2000. № 17(2). P. 125–139.
20. Mansor M., Harouaka K., Gonzales M. S., Macalady J. L., Fantle M. S. Transport-induced spatial patterns of sulfur isotopes ( $\delta^{34}\text{S}$ ) as biosignatures // Astrobiology. 2018. № 18. P. 59–72.

## THE FIRST OCCURRENCE OF SULFURIC ACID SPELEOGENESIS IN UZBEKISTAN (CENTRAL ASIA)

E. P. Bazarova<sup>a, #</sup>, O. I. Kadebskaya<sup>b</sup>, E. A. Tsurikhin<sup>c</sup>, A. M. Kononov<sup>a, d</sup>

*Presented by Academician of the RAS A.A. Baryakh February 18, 2024.*

<sup>a</sup>*Institute of the Earth Crust of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Mining Institute of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Ural branch of FSUE “Gosrybtsentr”, Ekaterinburg, Russian Federation*

<sup>d</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: bazarova@crust.irk.ru*

A cave formed during the process of sulfuric acid speleogenesis (SAS) was explored on the territory Uzbekistan. Evidence of sulfate speleogenesis includes the characteristic morphology of the cave, the upward flow of warm groundwater of a chloride-sulfate sodium-calcium composition with the release of hydrogen sulfide, the widespread development of ascending passage, the presence of biomats in water, and characteristic secondary minerals. Based on the chemical composition of the water and the values of stable isotopes of oxygen and deuterium, it was concluded that the underground water of the cave are formed by mixing infiltration waters and buried sedimentogenic waters of marine sediments. The cave is an example of active sulfuric acid speleogenesis in Uzbekistan.

**Keywords:** sulfuric acid speleogenesis (SAS), minerals, groundwater, isotopy, Gissar ridge, Uzbekistan