



THE ROLE OF FAULTS IN THE FORMATION OF THE OKHOTNICHYA CAVE (BAIKAL REGION)

I.K. Dekabryov , A.V. Cheremnykh 

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of an analysis of faults of different ranks near the Okhotnichya Cave in Pribaikalye, aimed at identifying their role in the formation and evolution of the cave and its adjacent areas. This was done using rank-wise structural-paragenetic analysis of faults, which forms the basis of a specialized mapping tool for fault zones. Factual evidence was obtained through several methods. The speleo-initiating fracture network was studied based on the results of the cave digital topographic survey performed using Leica DistoX 310 laser rangefinder. The therewith-generated 3D-model of the cave allowed making up a detailed plan of the passages for linking to the local geological-structural observations with mass fracture measurements and studying dip directions and strike orientations of the cave fractures. The results stated that the passages in the cave network correspond to the paragenesis of the right-lateral NNE trending strike-slip fault. Local analysis of rock fracturing within the cave made it possible to determine the type of kinematics of speleo-initiating fractures and to verify the reconstruction of the fault zone of the supra-local level. It has been stated that narrow tunnels follow the local NNE- and WNW-oriented strike-slip faults, and large chambers and grottoes follow the extension structures – ENE- and NE-striking normal faults. The lineament analysis of the cave-adjacent area revealed that the strike-slip fault network of the cave is an element of paragenesis of the regional normal fault, typical of the late-orogenic Baikal rift system. Thus, the conducted research showed that the genesis of the Okhotnichya Cave has a mixed character and provided the possibility of analyzing the karst caves' spatial patterns to reconstruct kinematic types of faults at different hierarchic levels – local, supra-local, and regional.

KEYWORDS: Okhotnichya Cave; karst; faults; fractures; lineaments; structural parageneses (fault families)

FUNDING: The study was done as part of the baseline budget project FWEF-2021-0009 "Recent Geodynamics, Lithospheric Destruction Mechanisms and Geological Hazards in Central Asia" of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation with the use of equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust SB RAS (grant 075-15-2021-682).



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Ilya K. Dekabryov, ilyadekabrev@gmail.com

Received: October 19, 2022

Revised: December 6, 2022

Accepted: December 12, 2022

FOR CITATION: Dekabryov I.K., Cheremnykh A.V., 2023. The Role of Faults in the Formation of the Okhotnichya Cave (Baikal Region). *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (3), 0704. doi:10.5800/GT-2023-14-3-0704

English version: see article page online

РОЛЬ РАЗРЫВОВ В ФОРМИРОВАНИИ ПЕЩЕРЫ ОХОТНИЧЬЕЙ (ЦЕНТРАЛЬНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

И.К. Декабрёв, А.В. Черемных

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты анализа разноранговых разрывных нарушений Прибайкалья в районе пещеры Охотничьей с целью установления их роли в формировании и развитии пещеры и прилегающих к ней территорий. Для реализации поставленной цели применен поранговый структурно-парагенетический анализ разрывов, составляющий основу метода специального картирования разломных зон. Фактический материал для исследования получен несколькими методами. Сеть спелеоиницирующих разрывов изучена на основе материалов цифровой топоъемки пещеры, проведенной с помощью лазерного дальномера Leica DistoX 310. Построенная при этом 3D-модель пещеры позволила составить детальный план ходов пещеры для привязки локальных геолого-структурных наблюдений с массовыми замерами трещиноватости, а также изучить ориентировку в пространстве элементов залегания разрывов пещеры. В результате было установлено, что сеть ходов пещеры соответствует парагенезу правого сдвига ССВ простираения. Анализ трещиноватости пород в пределах пещеры, проведенный на локальном уровне, позволил изучить кинематический тип спелеоиницирующих разрывов и верифицировать реконструкцию разломной зоны надлокального уровня. Установлено, что узкие щелевидные коридоры развиваются по локальным сдвигам ССВ и ЗСЗ ориентировки, а крупные залы и гроты пещеры – по структурам растяжения – сбросам ВСВ и СВ простираения. Линеаментный анализ прилегающей к пещере территории позволил установить, что сдвиговая разломная сеть пещеры является элементом парагенеза регионального сброса, характерного для Байкальской рифтовой системы на позднеорогенном этапе развития. Таким образом, проведенное исследование выявило смешанный генезис пещеры Охотничьей и показало возможность анализа пространственной сети карстовых форм пещер для реконструкций кинематического типа разрывных нарушений на разных иерархических уровнях – локальном, надлокальном и региональном.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пещера Охотничья; карст; разломы; трещиноватость; линеаменты; структурные парагенезы

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках базового бюджетного проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWEF-2021-0009 «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» с использованием оборудования и инфраструктуры ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что карстовый спелеогенез обусловлен преимущественно растворением вмещающих пород при водообмене. Движение воды, в свою очередь, контролируется трещиноватостью различного генезиса и разломами. На интенсивность карстообразования существенно влияют раскрытость и глубина трещин. Растворяя и расширяя стенки трещин, водотоки превращают их в карстовые полости [Pecherkin, 1986]. Разноранговые разломы и трещиноватость принимают на себя значительную часть поверхностного стока и обеспечивают циркуляцию подземных вод внутри скальных массивов [Kocharyan et al., 2001], поэтому образование подземных карстовых форм особенно актуально в зонах разрывных нарушений. Таким образом, при развитии карста важную роль играют тектонические трещины и более крупные разрывные нарушения – сбросы, взбросы, надвиги и сдвиги [Kataev, 2005, 2009; Gutareva, 2008]. Следовательно, морфология пещеры и закономерности пространственного распределения карстовых форм подчинены разломной сети, тектонической трещиноватости и естественной блочности карстующегося массива.

Трещины в пещерах подразделяют на следующие генерации [Klimchuk, Rogozhnikov, 1982; Klimchuk et al., 1995]:

1) трещины доспелеогенные пассивные – образовавшиеся до начала периода спелеогенеза. Они часто выполнены литифицированным глинисто-карбонатным или другим заполнителем;

2) трещины спелеоиницирующие – гидрогеологически активные в основной период спелеогенеза и преобразованные в карстовые каналы в результате растворения вмещающих пород циркулирующими в них водами. Они всегда прослеживаются по длинной оси пещерных форм и в слепых тупиках;

3) трещины постспелеогенные – возникшие после окончательного образования спелеоформ и секущие поверхности растворения; фиксируются по острым «свежим» ребрам в местах пересечения с поверхностями растворения. Они обычно зияющие, ширина их зияния может достигать 10–15 см.

Масштаб рассматриваемых трещин изменяется в широких пределах, что позволяет отнести их к разным рангам: от локальных трещин длиной десятки сантиметров до разрывов протяженностью в километры.

Кроме того, спелеоиницирующие дислокации могут являться элементами крупных зон разрывных нарушений. Так, в работе [Zolotarev, Kataev, 2012] показано подобие пространственного распределения поверхностных и подземных карстовых форм относительно линейных элементов рельефа – линеаментов.

Пещера Охотничья находится в 5 км от магистрального сбросового сместителя Ангаро-Бугульдейского разлома – крупного элемента Байкальской рифтовой системы [Mats et al., 2007] и, вероятнее всего, располагается в его зоне, на основании чего можно предположить существенный вклад разрывной тектоники и трещиноватости в ее формирование. Исследование проведено с целью установления роли разрывной тектоники в формировании и дальнейшем развитии карстового процесса в пещере Охотничьей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) изучить пространственную ориентацию системы ходов пещеры; 2) установить кинематические типы разрывных нарушений на разных ее участках; 3) откартировать в окрестностях пещеры разрывы, активные на неотектоническом этапе развития

региона; 4) выявить иерархическую соподчиненность изученных разрывных нарушений.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пещера Охотничья имени Н.Б. Сеньковской расположена в Северо-Западном Прибайкалье. Вход в пещеру находится на северо-восточном склоне отрога Приморского хребта, разделяющего бассейны рек Угловая и Еловка, на высоте около 900 м над уровнем моря, на расстоянии примерно 20 км от села Б. Голоустное и 5 км от побережья оз. Байкал. Согласно схеме спелеологического районирования, предложенной А.Г. Филипповым, пещера расположена в спелеологической области Прибайкальских гор [Filippov, 1993]. Пещера Охотничья локализована в онколитовых и строматолитовых известняках и доломитах улунтуйской свиты среднего – позднего протерозоя (рис. 1). Последние расположены на краю Сибирского кратона, реактивированного в кайнозое в результате рифтогенеза.

Улунтуйская свита представляет собой толщу темных и светлых серых известняков и доломитов, нередко с остатками водорослей, с оолитовыми и углистыми

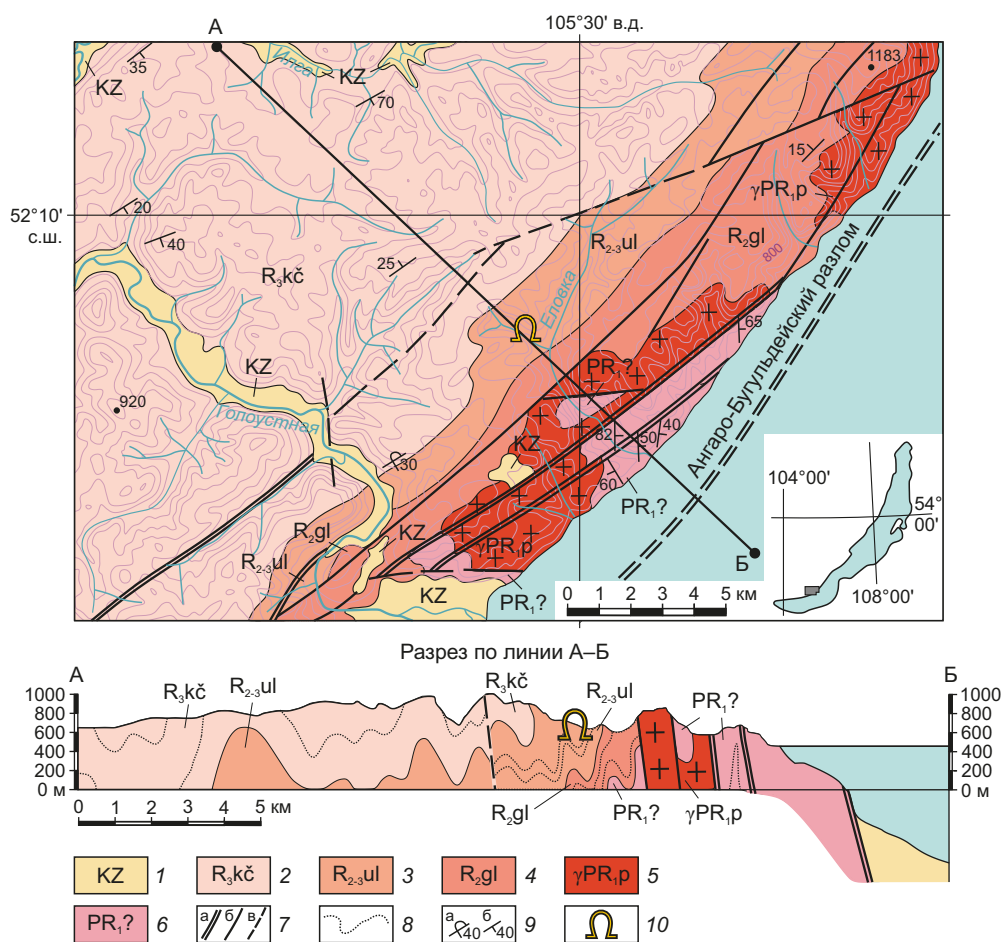


Рис. 1. Геологическая структура в окрестностях пещеры Охотничьей (составлена с использованием материалов [State Geological Map..., 1962, 2009]).

1 – кайнозойские аллювиальные, аллювиально-озерные, аллювиально-дельтовые, аллювиально-болотно-озерные отложения; 2–4 – Байкальская серия: 2 – качергатская свита: песчаники кварцевые, сланцы глинистые, углеродистые, алевроитовые, прослои песчаников, глинистых известняков, акритархи, 3 – улунтуйская свита: известняки, доломиты, известняки

доломитовые, сланцы глинистые, песчаники, строматолиты, микрофилиты, 4 – голоустенская свита: известняки, доломиты, в том числе марганценовые, песчаники кварцевые, карбонатно-кварцевые, прослои сланцев глинистых, алевролитов, гравелитов, строматолиты, микрофилиты; 5 – Приморский интрузивный комплекс: порфировидные, аляскитоидные граниты, лейкократовые и биотитовые средне- и мелкозернистые граниты, плагиограниты; 6 – раннепротерозойские? биотитовые, биотитово-роговообманковые и роговообманково-пироксеновые гнейсы, амфиболиты; 7 – тектонические контакты – разломы: а – активные в кайнозое, б – достоверные, в – предполагаемые; 8 – структурные особенности разреза; 9 – залегание слоев: а – опрокинутое, б – наклонное; 10 – пещера Охотничья.

Fig. 1. The geological structure in the vicinity of the Okhotnichya Cave compiled [State Geological Map..., 1962, 2009].

1 – Cenozoic alluvial, alluvial-lacustrine, alluvial-deltaic, alluvial-swamp-lacustrine deposits; 2–4 – Baikal series: 2 – Kachergat formation: quartz sandstones, clay, carbonaceous and siltstone shales, interlayers of sandstones and clayey limestones, acritarchs, 3 – Uluntui formation: limestones, dolomites, dolomitic limestones, clay shales, sandstones, stromatolites, microfilites, 4 – Goloustenskaya formation: limestones, dolomites (including manganese-bearing), quartz and carbonaceous-quartz sandstones, interlayers of clay shales, siltstones, gravelites; stromatolites, microfilites; 5 – Primorsky intrusive complex: porphyritic and alaskitoid granites, leucocratic and biotite medium- and fine-grained granites, plagiogranites; 6 – Early Proterozoic? biotite, biotite-hornblende and hornblende-pyroxene gneisses, amphibolites; 7 – tectonic contacts – faults: a – active in the Cenozoic, б – observed, в – inferred; 8 – structural features of the section; 9 – bedding: a – overturned, б – inclined; 10 – Okhotnichya Cave.

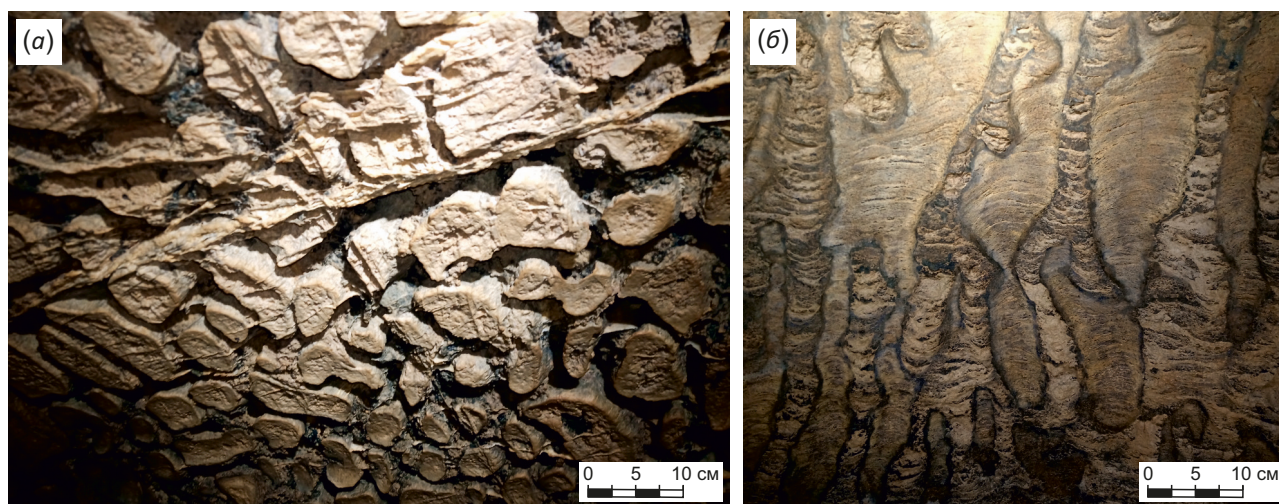


Рис. 2. Столбчатые строматолиты пещеры Охотничьей (фото И.К. Декабрёва). (а) – поперечное сечение; (б) – продольное сечение.

Fig. 2. Columnar stromatolites of the Okhotnichya Cave (photo by I.K. Dekabryov). (a) – cross section; (б) – longitudinal section.

прослойками, и подчиненных зеленоватых и серых глинисто-известковых сланцев, известковых филлитов и песчаников, развитых в Прибайкалье, которые залегают на голоустенской свите и согласно перекрываются породами качергатской свиты. Обнаруженные ископаемые остатки строматолитов (рис. 2) и положение улунтуйской свиты в разрезе, приуроченное к средней части байкальской серии, позволили отнести время ее образования к среднему – позднему рифею. Однако данные по изотопному датированию детритовых цирконов в отложениях улунтуйской свиты указывают на эдиакарский возраст [Gladkochub et al., 2013; Kuznetsov et al., 2013], который, согласно российской геохронологической шкале, соответствует вендскому периоду.

Пещерная система, общая протяженность ходов которой в 2007 г. составляла 5700 м, а амплитуда – 77 м [Osintsev, 2010], в настоящее время, по результатам топосъемочных экспедиций 2014–2015 гг., проведенных спелеоклубом «Арабика» под руководством А.Ю. Трегубова, характеризуется известной длиной 8226 м и

амплитудой 99 м [Shelepin, 2019]. Пещера заложена по серии субпараллельных разломов северо-северо-восточного простирания. Галереи пещеры представляют собой как объемные ходы, так и узкие высокие проходы (коридоры) с характерным щелевидным сечением. Высота их достигает 25 м (средняя 8–10 м), ширина 15 м (средняя около 3 м). Общая протяженность пещеры может увеличиться в результате дальнейших исследований.

В гидрогеологическом отношении пещера Охотничья приурочена к массиву карстовых трещинно-жильных вод Приморского хребта. Режим подземных вод во многом определяется количеством выпавших атмосферных осадков и характеризуется наличием устойчивой зимней межени [Palshin, 1968]. Водные хемогенные образования пещеры сложены кальцитом, арагонитом, моногидрокарбонатом и гипсом. В районах распространения сезонного оледенения были сделаны находки криоминеральных образований, сложены редким минералом икаитом – гексагидратом карбоната кальция [Bazarova et al., 2011]. В пещере широко

представлены вторичные образования различного генезиса: обвальные, водные механические, водные хемогенные, пещерный снег и лед (сезонные образования) и органогенные, к которым относятся кости животных. Найденные в пещере костные остатки предварительно датированы плейстоцен-голоценовым временем [Klementyev et al., 2007].

Также в пещере Охотничьей проводились исследования спелеотем (сталактиты, сталагмиты и другие натечные образования разной морфологии), изучались изменения климата и трансформации криолитозоны региона за последние 450 тыс. лет [Vaks et al., 2013]. Данные этих исследований позволяют установить примерный возраст карстовых полостей, который не должен превышать 500 тыс. лет.

Однако разрывная тектоника, предопределившая формирование карстовых плоскостей пещеры Охотничьей, практически не была изучена. Для восполнения этого «пробела» авторами проведены комплексные исследования разноранговых разрывных нарушений в пещере и ее окрестностях.

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как наиболее проницаемые для метеорных вод участки скального массива в настоящее время представлены карстовыми полостями «тела» пещеры, была произведена цифровая топографическая съемка и составлена 3D-модель пещеры. Работы выполнены с помощью лазерного дальномера Leica DistoX 310, который предназначен для измерения расстояний, расчета площади и объема. Благодаря датчику наклона производились как вертикальные, так и горизонтальные измерения. Кроме того, учтены препятствия в виде обвалов, глубоких разломов, колодцев и т.п. Для обработки пространственных данных и построения 3D-модели

использовались программы «Topodroid» и «Therion». Таким образом была изучена сеть спелеоиницирующих трещин, которая рассматривается авторами как разрывная структура надлокального ранга, образованная локальными разрывами – галереями пещеры.

В процессе цифровой топографической съемки пещеры проводилась привязка геолого-структурных наблюдений, которые включали в себя сбор данных в виде замеров элементов залегания разрывов и трещин, а также описание структурно-текстурных особенностей вмещающих пород, всех доступных поверхностей карстовых полостей. Кроме элементов залегания дизъюнктивных дислокаций, отмечались значимые вспомогательные для анализа данные: тип трещин (скол или отрыв), ранг (или размер), вторичная минерализация на стенках, зеркала со следами скольжения, смещение маркеров [Gzovsky, 1975; Nevsky, 1979; Chernyshev, 1983; и др.].

Замеры элементов залегания разрывов и трещин проведены на разных участках разломных ходов правой и центральной системы пещеры. Наблюдения с массовыми замерами трещин удавалось проводить только в расширенных частях пещерного коридора, в больших залах пещеры, где это возможно. Оптимальное количество трещин для одного локального замера, позволяющее зафиксировать все направления в объеме горных пород на уровне одного обнажения, – 100. Однако не везде удавалось сделать замер с сотней трещин. Основной причиной этому послужило развитие натечных образований (сталактиты, сталагмиты, занавеси, драпировки, флаги, кораллиты и т.п.), которые осложняют процесс измерения элементов залегания трещин либо делают его практически невозможным. В таких случаях замеры производились только при наличии четких крупных «сколовых» трещин

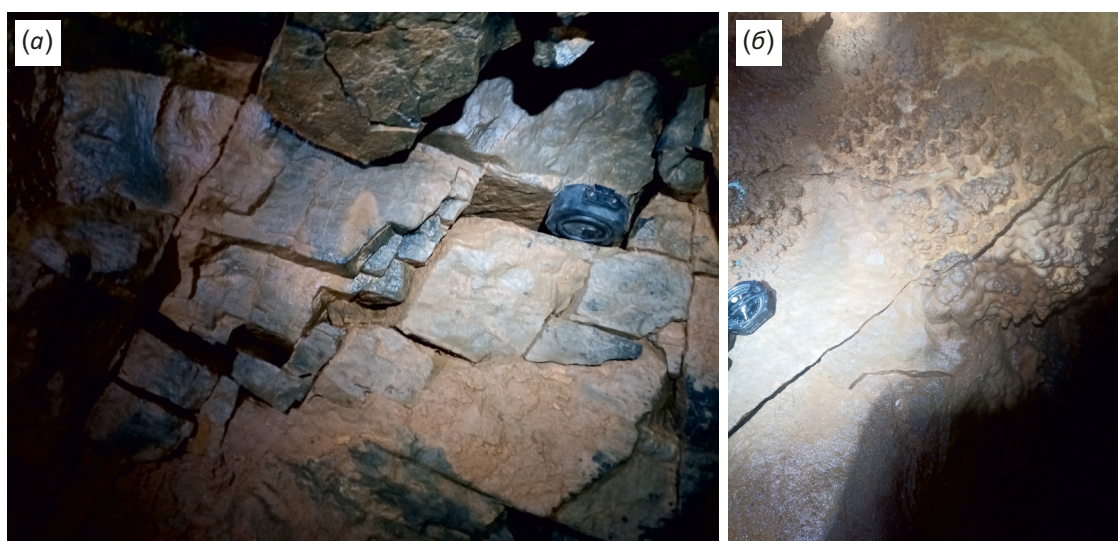


Рис. 3. Постспелеогенные трещины правой системы пещеры Охотничьей (фото И.К. Декабрёва). (а) – характер трещиноватости в гроте Обвальном; (б) – трещина, секущая натечные образования в гроте им. Н.Б. Сеньковской.

Fig. 3. Post-speleogenic fractures in the right side of the Okhotnichya Cave system (photo by I.K. Dekabryov). (a) – fracturing in the Obvalny grotto; (b) – a fracture intersecting the speleothems in the grotto named after N.B. Sen'kovskaya.

размером более 1 м либо «свежих» трещин, секущих натечные образования (постспелеогенные дислокации). Даже при малом количестве трещин (10–20 шт.) их направления могут послужить дополнительным подтверждением достоверности решений в нескольких соседних точках наблюдения [Burzunova, 2017]. Особый интерес представляют «свежие» трещины, секущие натечные образования (рис. 3), так как их анализ позволяет изучить наиболее молодые тектонические деформации.

Все полученные измерения элементов залегания разрывов и трещин анализировались методом порангового структурно-парагенетического анализа разрывов, составляющего основу специального картирования разломных зон [Seminsky, 2014, 2015]. Даже в слабообнаженных регионах этот метод позволяет на основе исследования небольших участков получить информацию о положении и типе разломных зон, а также реконструировать стресс-тензоры локального, надлокального и регионального ранга с оценкой их относительной последовательности. Для реконструкции стресс-тензоров с использованием данных о бороздах на зеркалах скольжения применялась программа Win-Tensor [Delvaux, Sperner, 2003], в основе которой

лежит инверсия Ж. Анжелье [Angelier, 1990] с добавлением оптимизации вращением [Delvaux, 1993].

Для анализа взаимосвязи региональной тектонической обстановки с разломной сетью пещеры было проведено картирование линейных форм рельефа – линеаментов. Линейные формы рельефа Прибайкалья, как правило, являются дизъюнктивными дислокациями [Sherman et al., 1984]. Систематизация линеаментов проведена путем построения роза-диаграмм. Затем для установления кинематических типов дизъюнктивов по методике порангового структурно-парагенетического анализа [Seminsky, 2014, 2015] роза-диаграммы линеаментов сопоставлялись со структурными парагенезами зон растяжения, сжатия, левостороннего и правостороннего сдвига. Это позволило нам уточнить кинематический тип разрывов в зоне влияния Ангаро-Бугульдейского разлома.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Разломная сеть пещеры Охотничьей по результатам анализа 3D-модели

Проведенная цифровая топо съемка правой и центральной систем пещеры позволила построить 3D-модель и детальный план ходов пещеры (рис. 4). Общая

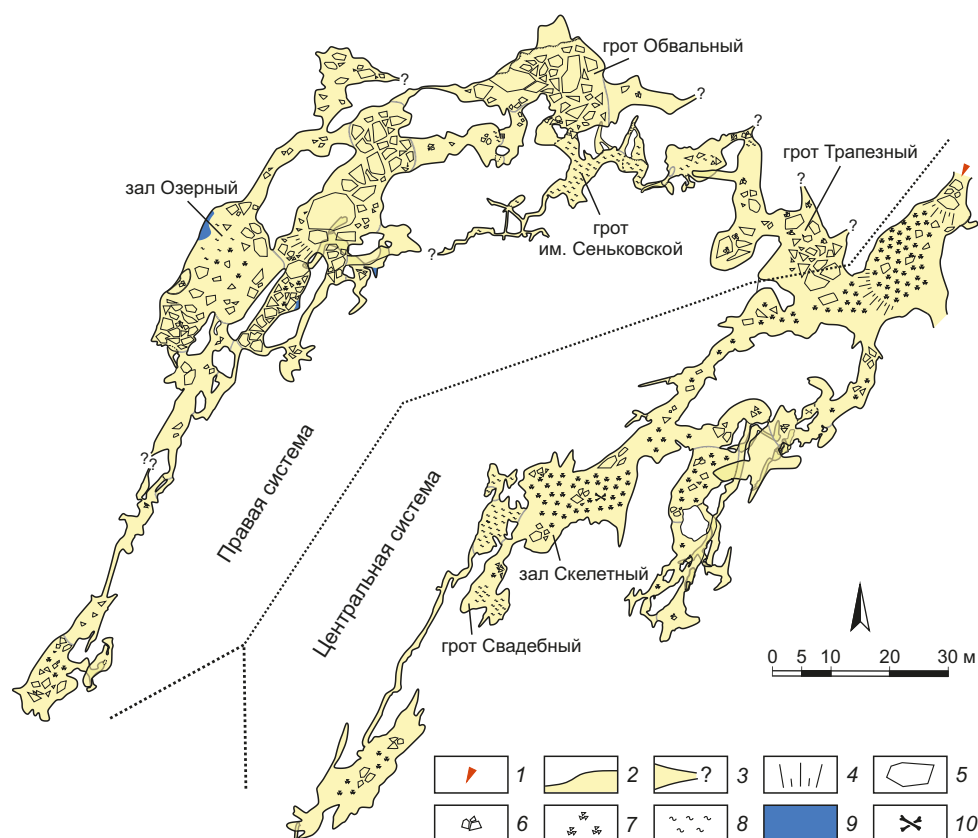


Рис. 4. План пещеры Охотничьей им. Н.Б. Сеньковской, построенный по результатам цифровой топографической съемки.

1 – вход в пещеру; 2 – стена (коренная); 3 – возможное продолжение; 4 – склон; 5 – внешняя кромка глыбы; 6 – глыбы, завал; 7 – щебень; 8 – глина; 9 – вода; 10 – кости.

Fig. 4. A plan of the Okhotnichya Cave named after N.B. Sen'kovskaya, made according to the results of digital topographic survey.

1 – cave entrance; 2 – rock wall; 3 – possible continuation; 4 – slope; 5 – outer edge of the block; 6 – blocks, blockage; 7 – crushed stone; 8 – clay; 9 – water; 10 – bones.

протяженность обозначенных выше систем пещеры составила 1803 м, а максимальная глубина относительно входа пещеры – 49 м. Все крупные залы и гроты имеют разную морфологию и общую для всех длинную ось с простиранием 60–80°, а простирание протяженных узких (щелевидных) коридоров варьируется от 15 до 50°.

Так как залы, гроты, а особенно узкие щелевидные коридоры представляют собой спелеоиницирующие дизъюнктивные нарушения, что зафиксировано при обследовании пещеры, был проведен анализ элементов их залегания с использованием построенной 3D-модели.

Определены элементы залегания крупных разломов и прочих структурных элементов пещеры. Выделены четыре крупные разломные зоны с двумя основными направлениями: 1) аз. пад. 310°∠35° и 290°∠55°; 2) аз. пад. 120°∠70° и 110°∠80° (рис. 5, а). Далее, выявлено 38 менее протяженных разрывов, длина которых варьировалась от 10 до 35 м (рис. 5, б). Часть последних разломов была заверена геолого-структурными

наблюдениями, произведенными в пещере. Для анализа этих разломов построена: круговая диаграмма плотности разрывов пещеры (рис. 5, в) и роза-диаграмма ориентировок разломных ходов пещеры (рис. 5, г).

На круговой диаграмме (сферограмме) выделено пять максимумов разрывов с высокой плотностью (приведена в процентах): 1) аз. пад. 120°∠80° (55 %); 2) аз. пад. 310°∠40° (20 %); 3) аз. пад. 0°∠90° (12.5 %); 4) аз. пад. 330°∠80° (12.5 %); 5) аз. пад. 357°∠40° (12.5 %), а также четыре максимума с меньшей плотностью. Положение максимумов сферограммы сопоставлено со структурными парагенезами разрывных нарушений – один из этапов спецкартирования разломных зон [Seminsky, 2014]. В результате получено два решения, которые объясняют положение всех максимумов диаграммы: 1) правый сдвиг с аз. пад. 120°∠80° (рис. 6, а), 2) – сброс с аз. пад. 310°∠40° (рис. 6, б).

Для устранения неоднозначности решения о кинематическом типе спелеоиницирующего разрывного нарушения в районе пещеры Охотничьей была построена роза-диаграмма азимутов простирания разрывов,

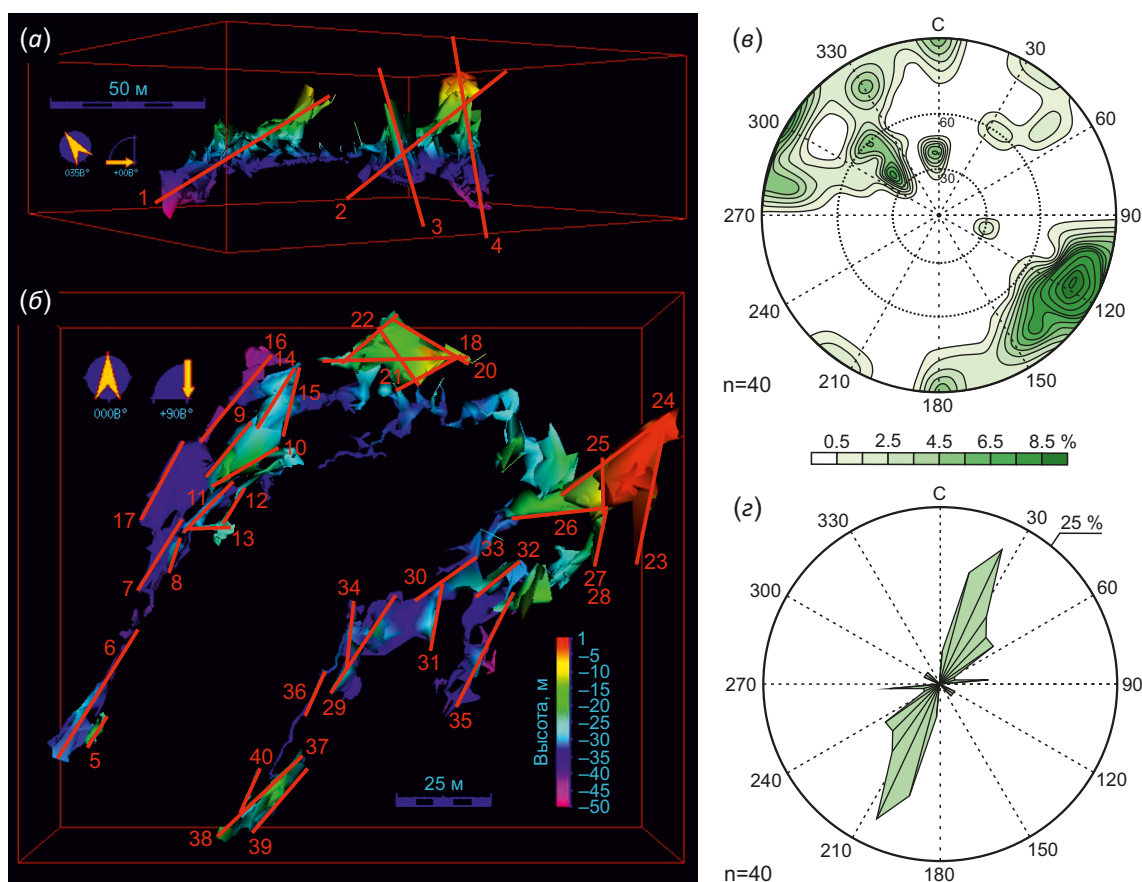


Рис. 5. Разломная сеть пещеры Охотничьей.

(а) – протяженные разрывы, выявленные при анализе 3D-модели пещеры; (б) – локальные разрывы протяженностью от 10 до 50 м, установленные при анализе 3D-модели пещеры; (в) – сферограмма плотности разломных ходов пещеры (проекция верхней полусферы); (г) – роза-диаграмма азимутов простирания разломных ходов пещеры.

Fig. 5. Fault network of the Okhotnichya Cave.

(а) – extensive faults identified during the analysis of the 3D-model of the cave; (б) – local faults ranging from 10 to 50 m in length, identified during the analysis of the 3D-model of the cave; (в) – a spherogram of the fault-related cave passage density (projection of the upper hemisphere); (г) – a rose diagram of the strike azimuths of the fault-related cave passages.

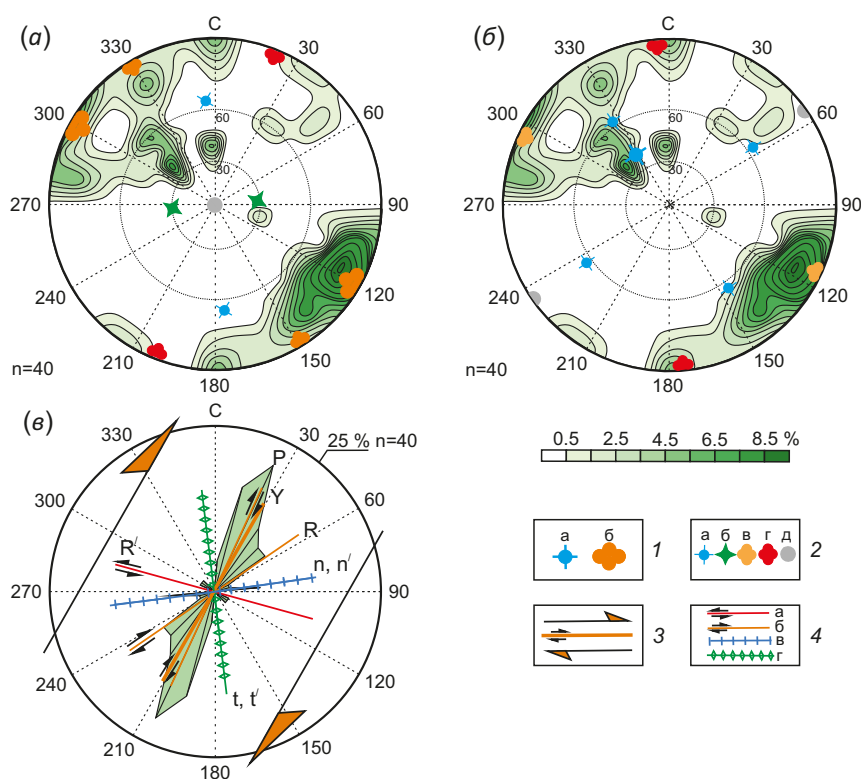


Рис. 6. Структурно-парагенетический анализ ориентировок разломных ходов пещеры.

(а) – сопоставление сферограммы разрывов с парагенезом зоны правостороннего сдвига; (б) – сопоставление сферограммы разрывов с парагенезом зоны сброса; (в) – сопоставление роза-диаграммы разрывов с парагенезом зоны правостороннего сдвига. 1–2 – полюсы разрывов: 1 – первого порядка: а – сброса, б – правостороннего сдвига, 2 – второго порядка: а – сброса, б – взброса, в – правого сдвига, г – левого сдвига, д – трансформационного типа; 3–4 – простираение разрывов структурного парагенеза правостороннего сдвига: 3 – зона разлома первого порядка и положение магистрального сместителя, 4 – разрывы второго порядка, образующие внутреннюю структуру зоны: а – левый сдвиг, б – правый сдвиг, в – сброс, г – взброс.

Fig. 6. Structural-paragenetic analysis of the orientations of the fault-related cave passages.

(а) – comparison of a spherogram of fractures with paragenesis of the dextral strike-slip fault zone; (б) – comparison of a spherogram of fractures with paragenesis of the normal fault zone; (в) – comparison of a rose diagram of fractures with paragenesis of the dextral strike-slip fault zone. 1–2 – poles of fractures: 1 – first-order fractures: а – related to normal faulting, б – related to right-lateral strike-slip faulting, 2 – second-order fractures: а – related to normal faulting, б – related to reverse faulting, в – related to right-lateral strike-slip faulting, г – related to left-lateral strike-slip faulting, д – related to transform faulting; 3–4 – strike of fractures associated with structural paragenesis of the dextral strike-slip fault: 3 – first-order fault zone and position of the major fault plane, 4 – second-order fractures comprising an inner structure of the fault zone: а – sinistral strike-slip fault, б – dextral strike-slip fault, в – normal fault, г – reverse fault.

которая также сравнивалась со структурными парагенезами разрывных нарушений.

Преобладающие направления роза-диаграммы удовлетворяют парагенезу разлома, формирующегося при сдвиговых деформациях с правосторонним перемещением крыльев и простираением магистрального сместителя 25° (рис. 6, в). Данному направлению роза-диаграммы соответствует 21 % от общего количества разломных ходов пещеры. Разрывы второго порядка в зоне правого сдвига первого порядка представлены правыми сдвигами – R-сколами с простираением 55° (8 %), сбросами – n и n' типа, которые вытянуты по направлению 85° (6 %), и левыми сдвигами – R' типа с простираением 300° (2 %). Разрывы t и t' в разломной системе пещеры проявлены весьма слабо. При анализе роза-диаграммы они не выявлены, однако структурно-парагенетический анализ построенной по тем

же данным сферограммы показал наличие слабо проявленного максимума с аз. пад. $105^\circ \angle 30^\circ$ (рис. 6, а).

Верификация полученного решения о кинематическом типе разлома, в зоне которого в последние 500 тыс. лет протекал карстовый процесс, проведена на основе анализа локальных разрывов и трещиноватости горных пород в разных частях пещеры.

4.2. Кинематические типы разрывов пещеры по результатам геолого-структурных наблюдений

Геометрия внутреннего пространства и обнаженность горных пород пещеры позволили провести геолого-структурные наблюдения с массовыми замерами трещиноватости в девяти пунктах. Шесть пунктов располагались в правой системе, а три – в центральной системе пещеры (рис. 7). Решения о локальных разрывах

в основном получены методом спецкартирования. Кроме того, в точке наблюдения № 9 зафиксированы зеркала со следами скольжения, что позволило произвести тектонофизические реконструкции двумя независимыми методами и таким образом верифицировать результат, полученный в данном пункте.

Рассмотрим результаты анализа локальных разрывов в пунктах проведения наблюдений. Так, точка наблюдения № 1 расположена в конце правой системы пещеры в зале с примерной площадью 90 м². Этот зал завершается крупным обвалом, образовавшим тупик. Анализ трещиноватости в этой точке позволил выявить сброс с аз. пад. 320°∠70° и правосторонний сдвиг с аз. пад. 100°∠70° (второе решение в точке). Точка наблюдения № 2 расположена в крупном зале с озером правой системы пещеры. Площадь зала составляет ~400 м². Из-за наличия большого количества натечных образований замерить элементы залегания удалось только у крупных трещин длиной 1.0–1.5 м, количество которых составило 30 штук. Установлено, что трещиноватость удовлетворяет разрыву сбросового кинематического типа с аз. пад. 135°∠45°. Левый сдвиг с аз. пад. 190°∠70° был реконструирован в

точке наблюдения № 3, расположенной в правой системе пещеры (грот Обвальный), площадью ~325 м².

Точка наблюдения № 4 расположена в правой системе пещеры, в гроте им. Н.Б. Сеньковской (площадь ~90 м²). Геолого-структурные наблюдения здесь интересны тем, что трещины в гроте секут натечные образования, в связи с чем их следует считать относительно «молодыми». Трещиноватость в гроте соответствует сбросу с аз. пад. 355°∠72°. В пункте № 5, расположенном в правой системе пещеры в безымянном гроте площадью ~50 м², наблюдались две зоны трещиноватости: 1) аз. пад. 170°∠65° и 2) аз. пад. 360°∠45°. Первая зона более проявлена, так как по ней в результате карстового процесса сформировался коридор длиной 7 м и шириной 1–2 м. Вторая зона, мощностью 0.5 м, примыкает к первой. По аналогии с т.н. № 4 можно предположить сбросовый характер этого разрыва с аз. пад. 170°∠65°. Также в расположенных по соседству пунктах № 6 (грот Трапезный, площадь ~110 м²) и № 7 (внутри у входа в пещеру, элементы залеганий трещин были замерены на рабочей площадке 70 м²) выявлены сбросы с близкими элементами залегания: аз. пад. 335°∠60° и аз. пад. 340°∠40°.

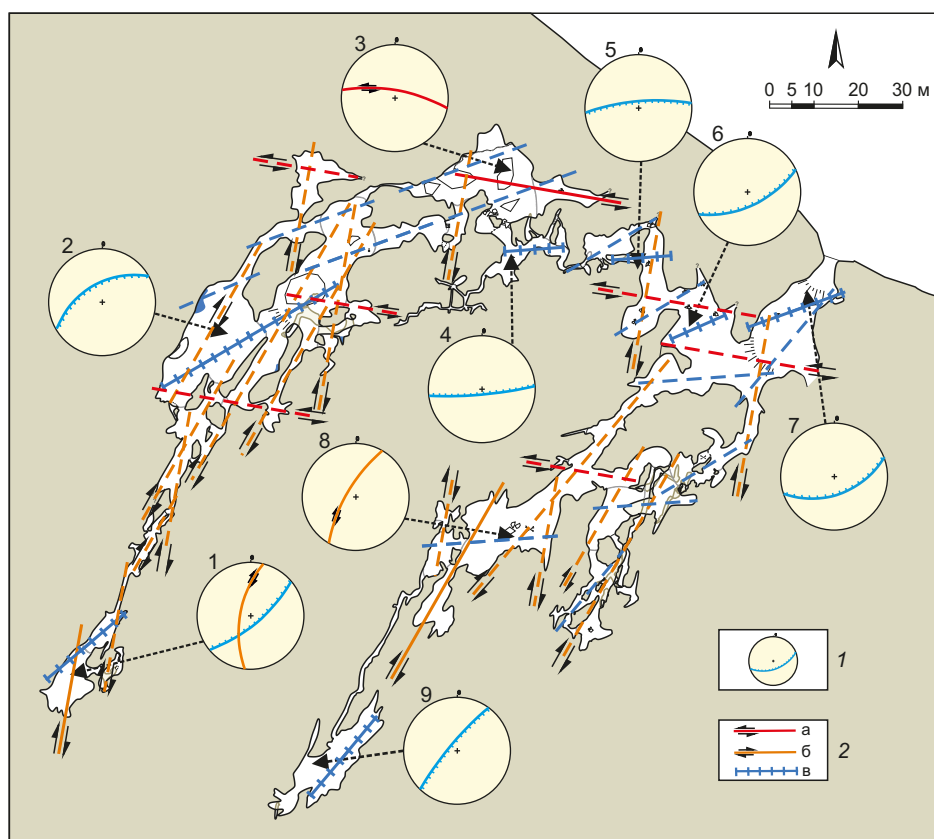


Рис. 7. Принципиальная схема разломной структуры пещеры Охотничьей.

1 – плоскости установленных разрывов (сферограммы построены в проекции верхней полусферы); 2 – кинематические типы разрывов: а – левые сдвиги, б – правые сдвиги, в – сбросы. Сплошными линиями пунктиром показаны разрывы, заверенные геолого-структурными наблюдениями, пунктиром – предполагаемые.

Fig. 7. A schematic diagram of the fault-related structure of the Okhotnichya Cave.

1 – identified fault planes (upper hemisphere projection); 2 – kinematic types of faults: а – left-lateral strike-slip faults, б – right-lateral strike-slip faults, в – normal faults. Solid lines show faults certified by geological and structural observations, dotted lines – assumed.

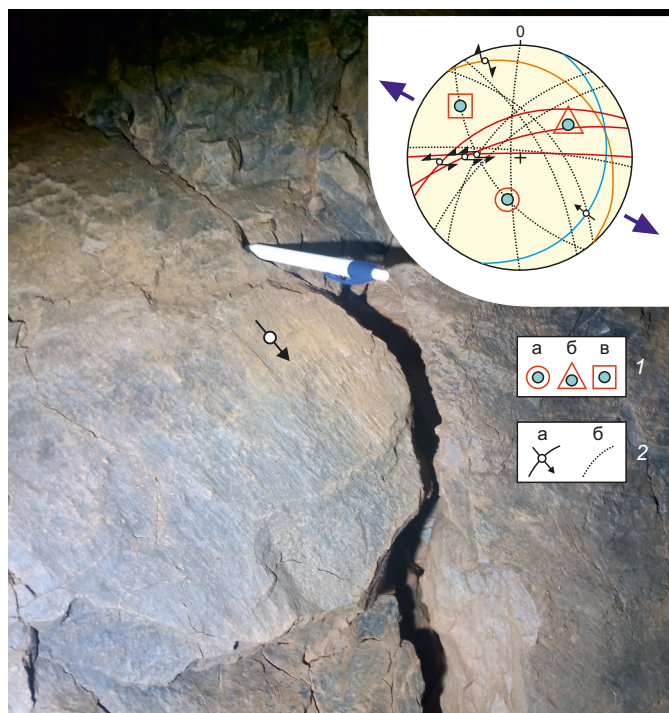


Рис. 8. Реконструкция напряженного состояния в точке наблюдения № 9.

1 – оси тектонических напряжений: а – сжатия, б – промежуточная, в – растяжения; 2 – положение плоскостей: а – зеркал скольжения (стрелка указывает направление перемещения висячего крыла, цвет показывает кинематический тип: оранжевый – правый сдвиг, красный – левый сдвиг, синий – сброс), б – отрывов. Диаграмма построена в проекции верхней полусферы.

Fig. 8. Stress state reconstruction for observation point No. 9.

1 – axes of tectonic stresses: а – compression, б – intermediate, в – extension; 2 – position of planes: а – slickensides (the arrow indicates the direction of movement of the hanging wall, the color shows the kinematic type: orange – right-lateral strike-slip fault, red – left-lateral strike-slip fault, blue – normal fault), б – tension joints. Upper hemisphere projection.

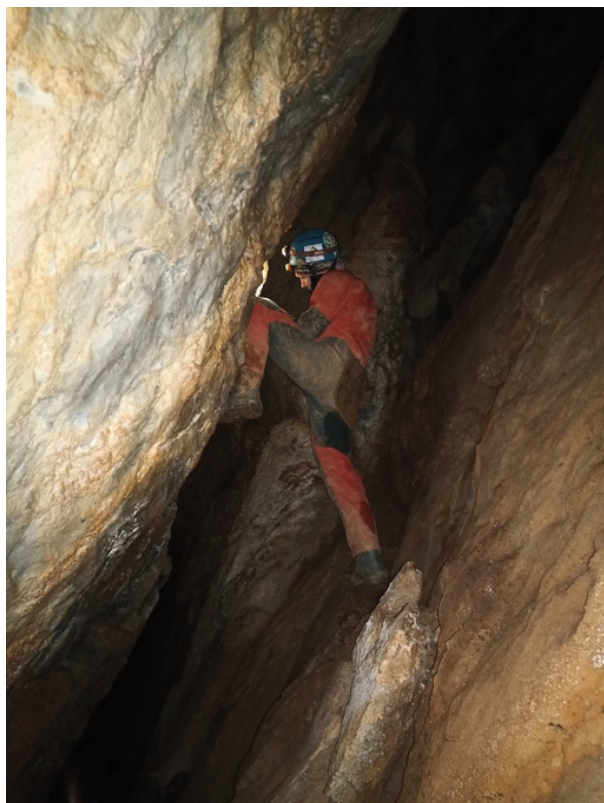


Рис. 9. Фотография щелевидного коридора правой системы пещеры.

Fig. 9. The slot-like corridor in the right side of the cave system.

В центральной системе пещеры, в гроте Скелетов площадью $\sim 280 \text{ м}^2$, точка наблюдения № 8, выявлен сдвиг с правосторонним перемещением крыльев, характеризующийся аз. пад. $120^\circ \angle 70^\circ$, что соответствует основному простиранию узких коридоров пещеры – $10\text{--}40^\circ$. В точке наблюдения № 9, расположенной в центральной системе пещеры, в безымянном гроте площадью $\sim 160 \text{ м}^2$ методом спецкартирования реконструирован сброс с аз. пад. $140^\circ \angle 70^\circ$. Здесь же на пяти разрывах зафиксированы следы скольжения, что позволило реконструировать поле тектонических напряжений в этой точке: $\sigma_1 - 130^\circ \angle 20^\circ$, $\sigma_2 - 235^\circ \angle 36^\circ$, $\sigma_3 - 17^\circ \angle 47^\circ$ (рис. 8).

Большинство изученных разрывов имеют сбросовый кинематический тип, так как замеры разрывов и трещин тяготели к крупным залам и гротам с простиранием $40\text{--}80^\circ$. Однако в узких щелевидных коридорах пещеры наблюдались плоскости более крупных разрывов, охарактеризованные в предыдущем разделе. В качестве примера приведем дизъюнктивное нарушение с аз. пад. $120^\circ \angle 80^\circ$ (рис. 9), которое соответствует разрыву 7 (см. рис. 5, 6). Такие разрывы характеризуются сдвиговым кинематическим типом с правосторонним перемещением крыльев, что подтверждается структурно-парагенетическим анализом как сети коридоров пещеры, так и локальных разрывов и трещиноватости горных пород в т.н. № 8.

В целом, локальные разрывы второго порядка различных кинематических типов, выявленные в разных частях пещеры, удовлетворяют парагенезу зоны сдвига

первого порядка с правосторонним перемещением крыльев. Таким образом, можно прогнозировать кинематический тип локальных разрывов соответствующего простирания, выявленных в пещере, на основе парагенеза зоны правого сдвига для всей пещерной системы (см. рис. 7).

4.3. Анализ линейных элементов рельефа в окрестностях пещеры

Для картирования дизъюнктивов, активных на неотектоническом этапе развития региона, использовались топоосновы масштаба 1:25000. Район исследования включал в себя территории, удаленные от пещеры на 6–15 км (рис. 10, а). Картировались линеаменты протяженностью более одного километра, выраженные в современном рельефе, а именно отрицательные или положительные формы рельефа: русла рек и временных водотоков, склоны водоразделов или отрогов хребта.

Всего было выделено 100 линейных элементов рельефа, большинство которых имеет простирание $35\text{--}45^\circ$, что составляет 32 % от общего числа линеаментов. Кроме того, выделяются следующие направления простирания линеаментов: 1) 15° (5 %), 2) 355° (8 %), 3) 325° (7 %), 4) широтное (8 %) (рис. 10, б).

Далее был проведен структурно-парагенетический анализ систем линеаментов, выделенных на роза-диаграмме (рис. 11). Анализ показал, что системы линеаментов удовлетворяют парагенезу сдвиговой зоны с левосторонним перемещением крыльев (рис. 11, а).

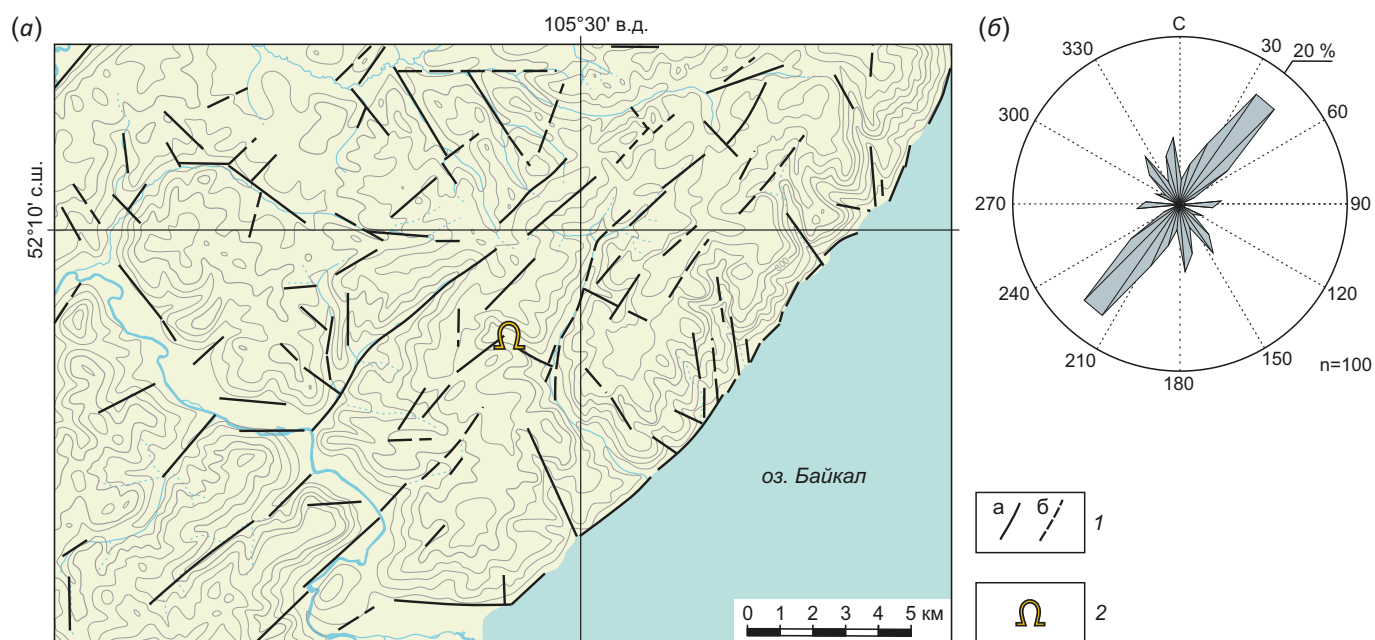


Рис. 10. Результаты линеamentного анализа в окрестностях пещеры Охотничьей.

(а) – схема линеаментов; (б) – роза-диаграмма ориентировок линеаментов. 1 – линеаменты: а – хорошо выраженные в рельефе, б – слабо проявленные в рельефе; 2 – местоположение пещеры.

Fig. 10. Lineament analysis results for the neighbourhood of the Okhotnichya Cave.

(а) – a diagram for lineaments; (б) – a rose diagram for lineament orientations. 1 – lineaments: well- (а) and poorly (б) pronounced in surface topography; 2 – location of the cave.

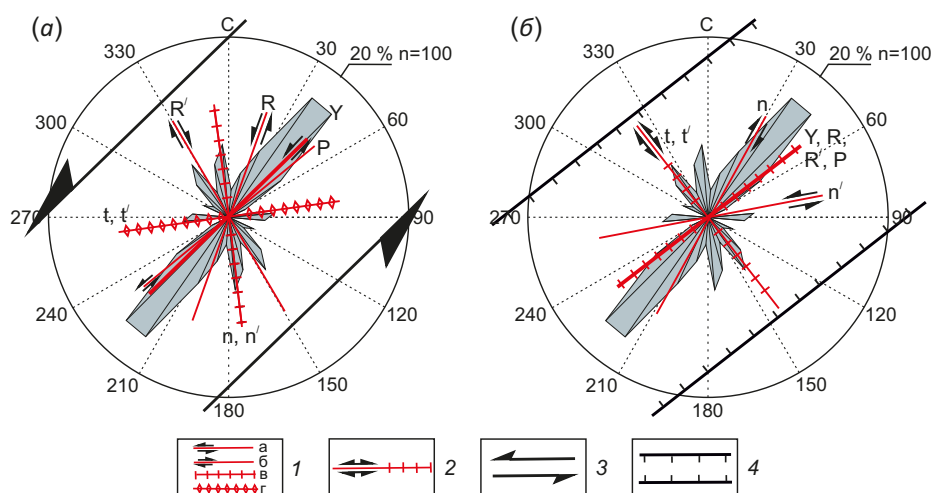


Рис. 11. Структурно-парагенетический анализ систем линейментов.

1 – плоскости левых сдвигов (а), правых сдвигов (б), сбросов (в) и взбросов (надвигов) (г) 2-го порядка; 2 – плоскости трансформационных сдвигов 2-го порядка (в зоне сдвига совпадают с плоскостью рисунка); 3–4 – зоны разломов 1-го порядка: 3 – левостороннего сдвига, 4 – сброса.

Fig. 11. Structural-para-genetic analysis of lineament systems.

1 – left-lateral shear planes (a), right-lateral shear planes (b), normal fault planes (v) and reverse (thrust) fault planes (r) of the 2nd order; 2 – the 2nd-order transform fault planes (coinciding with the plane of the figure in the strike-slip fault zone); 3–4 – the 1st-order fault zones of: 3 – left-lateral shear, 4 – normal fault.

Кроме того, роза-диаграмма согласуется с парагенезом сбросовой зоны, пусть и с меньшей определенностью (рис. 11, б).

Реконструкции разрывных нарушений различного кинематического типа, полученные методом спецкартирования для сети коридоров и залов пещеры, трещиноватости горных пород и линейментов удовлетворяют иерархии разрывов соответствующих структурных парагенезов. Кроме того, они отражают смену динамических обстановок в ходе неотектонического этапа развития района исследования. Эти особенности иерархии дизъюнктивных нарушений и наложенный характер деформации рассмотрены авторами при обсуждении полученных результатов.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. О роли разрывов в формировании пещеры

Имеющуюся, на первый взгляд, неоднозначность реконструкции кинематического типа для разломной сети пещеры, а именно одновременное наличие двух решений для круговой диаграммы (правосдвиговый и сбросовой механизм), можно объяснить развитием в пещере локальных структур растяжения в правосдвиговой разломной зоне надлокального уровня. В пользу данной трактовки выступает тот факт, что в результате анализа разломной сети на основе сопоставления простираций разрывов и максимумов роза-диаграммы был получен только один вариант решения о кинематическом типе разлома – сдвиг с правосторонним перемещением крыльев (см. рис. 6, в). Этот парагенез учитывает большинство разрывов второго порядка, кинематику которых подтвердили локальные геолого-структурные наблюдения и анализ массовых замеров

трещиноватости. Практически не выявлены только направления, соответствующие структурам сжатия. Отсутствие в пещере крупных карстовых полостей с ориентировкой от 315 до 0° (разрывы t и t' типа в надлокальном правосдвиговом парагенезе пещеры) можно объяснить следующими обстоятельствами. Данные элементы структурного парагенеза перпендикулярны оси сжатия. Формирование этих разрывов, во-первых, может не произойти, если перемещение крыльев сдвига незначительное, а, во-вторых, в процессе формирования разрывов t и t' типа их стенки сомкнуты, что осложняет циркуляцию водных потоков. Вследствие этого спелеогенез и развитие карста в данных локальных обстановках, вероятно, замедляются или практически полностью приостанавливаются. Кроме того, при подвижке по основному направлению крупных сдвиговых разломов стенки данных структур подвержены полному смыканию или образованию завалов вместо образованных по этим направлениям разломных ходов пещеры.

Структуры растяжения, в свою очередь, подтверждаются результатами анализа разрывов и трещиноватости, при этом значительное количество сбросовых решений обусловлено тем, что замеры, как правило, были выполнены в крупных залах и гротах пещеры в связи с их доступностью и тектонической проработанностью. Сбросы и сдвиго-раздвижки с простираем от 40 до 80°, по-видимому, являются основной причиной формирования всех крупных залов, гротов и галерей. Кроме того, активность этих структур подтверждается развитием постспелеогенных трещин, а сбросовой характер верифицирован изучением штриховки на зеркалах скольжения, что отмечено при описании результатов геолого-структурных наблюдений.

Сдвиговый кинематический тип некоторых разрывов тоже был заверен в результате геолого-структурных наблюдений. Немногочисленность сдвигов связана со сложностью изучения трещиноватости в их окрестностях. В настоящее время эти разрывы образуют узкие коридоры пещеры, что обусловлено особенностями протекания спелеогенеза. Однако кинематический тип, выявленный при анализе 3D-модели разломной зоны с правосторонним перемещением крыльев (надлокальный иерархический уровень), подтверждается локальными решениями, полученными при анализе трещиноватости в конце правой системы пещеры и в ее центральной системе – решения в т.н. № 1 и № 9 (см. рис. 7). Данные структуры представляют собой хорошо проявленные коридоры (разрывы) с высокими субвертикальными и наклоненными под углами 70–80° к горизонту проходами и характерным щелевидным сечением (см. рис. 9). Они характеризуются средним аз. пад. $120^\circ \angle 80^\circ$, значительной протяженностью и составляют более половины (55 %) от общего числа ходов пещеры. Локальный разрыв в т.н. № 3 – сдвиг с левосторонним перемещением крыльев северо-западного простирания – дополняет парагенез более крупной разломной зоны.

Таким образом, сеть спелеоиницирующих разрывных нарушений представляет собой зону правостороннего сдвига с простиранием 30° надлокального уровня, которой соответствуют локальные сдвиги и сбросы.

Формирование этой сети обусловило инициацию карстового процесса, протекающего в пещере последние 500 тыс. лет, а развитие очага постспелеогенной трещиноватости свидетельствует об активизации одного из локальных разрывов сбросового кинематического типа.

5.2. Разломная система пещеры как элемент крупной разломной структуры Прибайкалья

Формирование разломной структуры Прибайкалья связано со сменой регионального поля напряжений на разных этапах развития региона. Это актуально и для новейшего времени, когда сдвиговое поле напряжений, характерное для раннеорогенного этапа (начиная с 30 млн лет назад), сменилось полем растяжения позднеорогенного этапа, характерным и для современного этапа развития Прибайкалья (начиная с 3 млн лет назад) [Delvaux et al., 1997; Sankov et al., 1997; Seminsky, 2003; Cheremnykh et al., 2020].

Результаты нашего исследования показали, что линеаменты изучаемой территории были сформированы при сдвиговых деформациях с левосторонним перемещением крыльев с простиранием 45° (рис. 11, а). Кроме того, по результатам спецкартирования для систем линеаментов получено решение, соответствующее парагенезу зоны растяжения (рис. 11, б), что подтверждает представления о поэтапной смене регионального поля напряжений на неотектоническом этапе

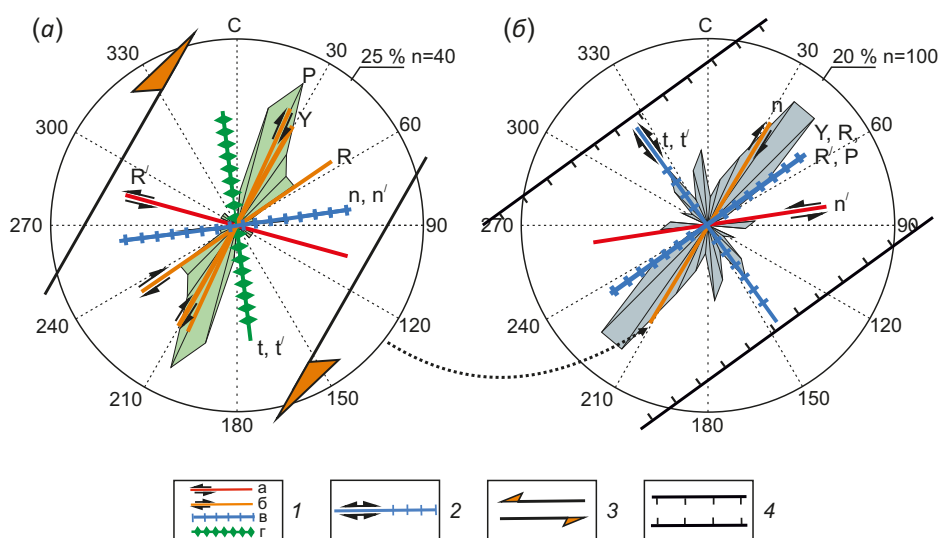


Рис. 12. Иерархическая соподчиненность разноранговых разрывных структур в районе пещеры Охотничьей.

Полученные решения: (а) – парагенез правого сдвига разломной системы пещеры (надлокальный уровень); (б) – парагенез сброса в зоне влияния Ангаро-Бугульдейского разлома (региональный уровень). 1 – плоскости левых сдвигов (а), правых сдвигов (б), сбросов (в) и взбросов (надвигов) (г) 2-го порядка; 2 – плоскости трансформационных сдвигов 2-го порядка (в зоне сдвига совпадают с плоскостью рисунка); 3–4 – зоны разломов 1-го порядка: 3 – правостороннего сдвига, 4 – сброса.

Fig. 12. Faults hierarchy in the area of the Okhotnichya Cave.

Solutions: (а) – paragenesis of the right lateral strike-slip fault plane in the fracture cave system (supra-local level); (б) – normal fault paragenesis in the zone of influence of the Angara-Buguldeka fault (regional level). 1 – second-order left-lateral fault planes (а), right-lateral fault planes (б), normal fault planes (в) and reverse (thrust) fault planes (г); 2 – second-order transform lateral fault planes (coinciding with the plane of the figure in the strike-slip fault zone); 3–4 – first-order fault zones: 3 – right-lateral fault zones, 4 – normal fault zones.

развития региона. Сдвиговая система разломов пещеры с правосторонним перемещением крыльев (рис. 12, а), соответствует этому региональному байкальскому растяжению (рис. 12, б).

Таким образом, сеть спелеоиницирующих разрывов в районе пещеры, по нашему мнению, сформировалась только на позднеорогенном этапе развития региона и связана со сбросовыми перемещениями по Ангара-Бугульдейскому разлому. Этот крупный дизъюнктив является одним из основных рифтообразующих разломов и протягивается более чем на 100 км. Зона влияния такого разлома, магистральный сместитель которого скрыт водами вблизи побережья оз. Байкал, имеет значительную ширину, а пещера Охотничья, удаленная в глубь континента на 5 км, расположена в ее пределах. Однако собственно пещера развивалась по сдвиговой зоне второго порядка (надлокальный уровень) по отношению к сбросу первого порядка (региональный уровень).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование выявило смешанный генезис пещеры Охотничьей. Согласно генетической классификации подземных полостей [Dublyansky, Andreychouk, 1989], пещеру Охотничью нельзя отнести в полной мере к определенному подклассу. В данной пещере сочетаются признаки двух подклассов: тектоногенного и карстогенного.

Хорошо выраженная щелевидная морфология большинства карстовых полостей и закономерный рисунок их сети указывает на ведущую роль разрывов при формировании пещеры, которая локализована в онколито-вых и строматолитовых известняках и доломитах улунтуйской свиты среднего – позднего протерозоя.

Спелеоиницирующая сеть разломов была заложена на позднеорогенном этапе развития Прибайкалья и представляет собой зону правостороннего сдвига с простиранием 30°. Этот сдвиг является элементом парагенеза регионального сброса северо-восточного простирания. При этом анализ постспелеогенной трещиноватости – «свежих» трещин, нарушающих натечные образования, свидетельствует о неизменности динамической обстановки от момента образования спелеоиницирующей разломной сети пещеры.

Кроме того, проведенное исследование показало возможность анализа пространственной сети карстовых форм пещер для реконструкций кинематического типа разрывных нарушений на разных иерархических уровнях – локальном, надлокальном и региональном.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность иркутским спелеологам клуба «СпелеоМИР» за помощь в сборе геолого-структурной информации, отдельная благодарность – С.С. Карчевскому за помощь в проведении топосъемки и построение 3D-модели пещеры, а также Ю.П. Бурзуновой и О.С. Гутаревой за замечания и советы, позволившие улучшить данную рукопись.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Angelier J., 1990. Inversion of the Field Data in Fault Tectonics to Obtain the Regional Stress III. A New Rapid Direct Inversion Method by Analytical Means. *Geophysical Journal International* 103 (2), 363–376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01777.x>.

Bazarova E.P., Gutareva O.S., Kononov A.M., Ushchapovskaya Z.F., Nartova N.V., Osintsev A.V., 2011. Minerals of the Okhotnichya Cave (Baiukal Region, Irkutsk Oblast). *Speleology and Karstology* 7, 5–14 (in Russian) [Базарова Е.П., Гутарева О.С., Кононов А.М., Ушаповская З.Ф., Нартова Н.В., Осинцев А.В. Минералы пещеры Охотничья (Байкальский регион, Иркутская область) // *Спелеология и карстология*. 2011. № 7. С. 5–14].

Burzunova Yu.P., 2017. Rock Fractures near Faults: Specific Features of Structural-Paragenetic Analysis. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (3), 673–693 (in Russian) [Бурзунова Ю.П. Трещины горных пород вблизи разломов: особенности применения структурно-парагенетического анализа // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 3. С. 673–693]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0312>.

Cheremnykh A.V., Burzunova Yu.P., Dekabryov I.K., 2020. Hierarchic Features of Stress Field in the Baikal Region: Case Study of the Buguldeika Fault Junction. *Journal of Geodynamics* 141–142, 101797. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101797>.

Chernyshev S.N., 1983. *Rock Fractures*. Nauka, Moscow, 240 p. (in Russian) [Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.].

Delvaux D., 1993. The TENSOR Program for Paleostress Reconstruction: Examples from the East African and the Baikal Rift Zones. *Terra Nova* 5 (Abstr. Suppl. 1), 216.

Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., Sankov V., 1997. Paleostress Reconstruction and Geodynamics of the Baikal Region, Central Asia. Part II: Cenozoic Rifting. *Tectonophysics* 282 (1–4), 1–38. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2).

Delvaux D., Sperner B., 2003. Stress Tensor Inversion from Fault Kinematic Indicators and Focal Mechanism Data: The TENSOR Program. In: D. Nieuwland (Ed.), *New Insights into Structural Interpretation and Modelling*. Geological Society of London Special Publications 212, p. 75–100.

Dublyansky V.N., Andreychouk V.N., 1989. *Speleology (Terminology, Relationship with Other Sciences, Classification*

of Cavities). Publishing House of the Ural Branch of the USSR Academy of Sciences, Sverdlovsk, 35 p. (in Russian) [Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н. Спелеология: терминология, связи с другими науками, классификация полостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 35 с.].

Filippov A.G., 1993. Caves of the Irkutsk Region. In: Peshchery. Results of Investigations. Interuniversity Collection of Scientific Transactions. Publishing House of Perm University, Perm, p. 71–83 (in Russian) [Филиппов А.Г. Пещеры Иркутской области // Пещеры. Итоги исследований: Межвузовский сборник научных трудов. Пермь: Изд-во Пермского университета, 1993. С. 71–83].

Gladkochub D.P., Nicoll G., Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Tait J., 2013. Age and Sources of Late Precambrian Sedimentary Sequences of the Southern Baikal Region: Results of the U-Pb LA-ICP-MS Dating of Detrital Zircons. *Doklady Earth Sciences* 450, 494–498. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13050097>.

Gutareva O.S., 2008. Tectogenesis and the Process of Karst Formation (Pre-Baikal Premountain Depression). *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 4 (36), 8–12 (in Russian) [Гутарева О.С. Тектогенез и процесс карстообразования (предбайкальский предгорный прогиб) // Вестник ИРГТУ. 2008. №4 (36). С. 8–12].

Gzovsky M.V., 1975. *Fundamentals of Tectonophysics*. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.].

Kataev V.N., 2005. Structural-Tectonic Analysis in Karstology. *Modern High Technologies* 11, 49–50 (in Russian) [Катаев В.Н. Структурно-тектонический анализ в карстоведении // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 11. С. 49–50].

Kataev V.N., 2009. A Role of Structural-Tectonic Features of the Territory in the Evolution of Karst Processes. *Inter Carto. InterGIS* 15 (2), 458–462 (in Russian) [Катаев В.Н. Роль структурно-тектонических особенностей территории в развитии карстовых процессов // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2009. Т. 15. № 2. С. 458–462].

Klementyev A.M., Korshunov E.O., Osintsev A.V., 2007. Cave Okhotnichia – The New Site of Ancient Fauna in Primorsky Mountain Ridge (Western Cisbaikalia). *Reports of the Laboratory of Ancient Technologies* 5, 146–153 (in Russian) [Клементьев А.М., Коршунов Е.О., Осинцев А.В. Пещера Охотничья – новое местонахождение ископаемой фауны в Приморском хребте (Западное Прибайкалье) // Известия лаборатории древних технологий. 2007. № 1 (5). С. 146–153].

Klimchuk A.B., Andreychouk V.N., Turchinov I.I., 1995. The Structural Prerequisites of Speleogenesis in Gypsum in the Western Ukraine. *Ukrainian Speleological Association*, Kiev, 104 p. (in Russian) [Климчук А.Б., Андрейчук В.Н., Турчинов И.И. Структурные предпосылки спелеогенеза в гипсах Западной Украины. Киев: Украинская спелеологическая ассоциация, 1995. 104 с.].

Klimchuk A.B., Rogozhnikov V.Ya., 1982. Heterochronous Fracture Systems in Gypsum in Podolia and Speleogenesis. In: Kurikilitsa S.I. (Ed.), *Deep-Seated Karst Conditions in the*

USSR: Objectives and Methodology of the Study. Abstracts of the III All-Union Karst-Speleological Meeting (October 1–3, 1982, Alushta). Moscow, p. 140–141 (in Russian) [Климчук А.Б., Рогожников В.Я. Разновозрастность систем трещин в гипсах Подолии и спелеогенез // Состояние, задачи и методы изучения глубинного карста СССР: Тезисы докладов III Всесоюзного карстово-спелеологического совещания (1–3 октября, 1982 г., Алушта) / Ред. С.И. Кирикилица. М., 1982. С. 140–141].

Kocharyan G.G., Livshits L.D., Pavlov D.V., Pernik L.M., 2001. Study of Deformation Properties and Permeability of Areas of Discontinuity in the Rock Massifs. *Geocology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology* 1, 3–15 (in Russian) [Кочарян Г.Г., Лившиц Л.Д., Павлов Д.В., Перник Л.М. Исследование деформационных свойств и проницаемости зон нарушений сплошности скальных массивов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2001. № 1. С. 3–15].

Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Letnikova E.F., Kaurova O.K., Konstantinova G.V., 2013. Age Constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from Combined SR Isotopes and Pb-Pb Dating of Carbonates from the Baikal Type Section, Southeastern Siberia. *Journal of Asian Earth Sciences* 62, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2011.06.003>.

Mats V.D., Lobatskaya R.M., Khlystov O.M., 2007. Evolution of Faults in Continental Rifts: Morphotectonic Evidence from the South-Western Termination of the North Baikal Basin. *Earth Science Frontiers* 14 (1), 207–219. [https://doi.org/10.1016/S1872-5791\(07\)60009-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5791(07)60009-8).

Nevsky V.A., 1979. *Fracture Tectonics of Ore Fields and Deposits*. Nedra, Moscow, 224 p. (in Russian) [Невский В.А. Трещинная тектоника рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1979. 224 с.].

Osintsev A.V., 2010. Large Caves of the Baikal Region – The Newest Explorations. In: *Speleology and Speleostology: Development and Interaction of Sciences. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (November 16–20, 2010). NCSPI, Naberezhnyye Chelny, p. 99–101 (in Russian) [Осинцев А.В. Крупные пещеры Байкальского региона – новейшие исследования // Спелеология и спелестология: Развитие и взаимодействие наук: Материалы международной научно-практической конференции (16–20 ноября 2010 г.). Набережные Челны: НГПИ, 2010. С. 99–101].

Palshin G.B. (Ed.), 1968. *Engineering Geology of Pribaikalye*. Nauka, Moscow, 189 p. (in Russian) [Инженерная геология Прибайкалья / Ред. Г.Б. Пальшин. М.: Наука, 1968. 189 с.].

Pecherkin A.I., 1986. Relationship between Large Cave Systems of Sulfate Karst and Tectonic Fracture Distribution. In: *Caves. Study Methods. Interuniversity Collection of Scientific Transactions*. Publishing House of Perm University, Perm, p. 48–57 (in Russian) [Печеркин А.И. Связь крупных пещерных систем сульфатного карста с распределением тектонической трещиноватости // Пещеры. Методика изучения: Межвузовский сб. научных трудов. Пермь: Изд-во Пермского университета, 1986. С. 48–57].

Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Lukhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D., 1997. Cenozoic Tectonic Stress Field Evolution in the Baikal Rift Zone. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine* 21 (2), 435–455.

Seminsky K.Zh., 2003. Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. GEO, Novosibirsk, 244 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 244 с.].

Seminsky K.Zh., 2014. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones. Part 1: Basic Theoretical Concepts and Principles. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 445–467 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.

Seminsky K.Zh., 2015. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones. Part 2: Main Stages and Prospects. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (1), 1–43 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>.

Shelepin A.L. (Ed.), 2019. Atlas of Caves of Russia. Moscow, 768 p. (in Russian) [Атлас пещер России / Ред. А.Л. Шелепин. М., 2019. 768 с.].

Sherman S.I., Levi K.G., Ruzhich V.V., Sankov V.A., Dneprovskiy Yu.I., Rasskazov S.V., 1984. Geology and Seismicity of the BAM Zone (from Baikal to Tynda). *Neotectonics*.

Nauka, Novosibirsk, 207 p. (in Russian) [Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Саньков В.А., Днепроvский Ю.И., Рассказов С.В. Геология и сейсмичность зоны БАМ (от Байкала до Тынды). Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 207 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2009. Angara-Yenisei Series. Scale 1:1000000. Sheet N-48 (Irkutsk). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 574 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Ангара-Енисейская. Масштаб 1:1000000. Лист N-48 (Иркутск): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 574 с.].

State Geological Map of the USSR, 1962. Pribaikalskaya Series. Scale 1:200000. Sheet N-48-XXXIV. Moscow (in Russian) [Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Прибайкальская. Лист N-48-XXXIV. М., 1962].

Vaks A., Gutareva O.S., Breitenbach S.F.M., Avirmed E., Mason A.J., Thomas A.L., Osinzev A.V., Kononov A.M., Henderson G.M., 2013. Speleothems Reveal 500,000-Year History of Siberian Permafrost. *Science* 340 (6129), 183–186. <https://doi.org/10.1126/science.1228729>.

Zolotarev D.R., Kataev V.N., 2012. Analysis of the Relationship between the Structural-Tectonic Architecture and Karst Formation within the Polaznensky Local Structure. *Proceedings of the Kazan University. Natural Sciences Series* 154 (3), 196–204 (in Russian) [Золотарев Д.Р., Катаев В.Н. Анализ соотношения структурно-тектонического строения и закарстованности в пределах Полазненской локальной структуры // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2012. Т. 154. № 3. С. 196–204].