РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.435.84; 551.89

СТРОЕНИЕ И ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПЕЩЕРЫ ПОДМОСКОВНОЙ

В.А. Неходцев[1], Д.И. Гаршин[2], А.М. Пожидаев[3]

[1] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра геоморфологии и палеогеографии*
[2] *Русское географическое общество, Московское городское отделение*
[2, 3] *Спелеоклуб «Тетис» (г. Ступино)*

[1] *Соискатель; e-mail: baban.n@mail.ru*
[2] *Руководитель спелеоклуба; e-mail: sso.tetis@gmail.com*
[3] *e-mail: andr.pozhidaeff@yandex.ru*

В феврале 2020 г. под д. Новленское (юг Ближнего Подмосковья) была открыта карстовая пещера Подмосковная, к настоящему времени признанная самой протяженной природной пещерой Московской области и одной из самых длинных в Центральной России. Однако, особая ценность открытия заключается в уникальности проведенного авторами исследования: пещера относится к редкому и малоизученному русскому (закрытому) типу карста. Полость коррозионно-карстового происхождения сформировалась на глубине около 18 м в среднекаменноугольных известняках, перекрытых бронирующим горизонтом верхнеюрских глин. Представлены результаты обследования Подмосковной, многие ходы которой приходилось расширять вручную: описание пещеры и ее отложений, топографический план, пространственная (точность ±5 м) и высотная (точность ±1 м) привязка к поверхности. Подмосковная относится к паводковым лабиринтам (иррегулярна в плане), состоит из двух ярко выраженных пещерных этажей, соединенных карстовыми 2,5–3-метровыми колодцами. Длина картографированных ходов к моменту публикации статьи превысила 190 м. Настоящее исследование подробно реконструирует историю развития пещеры: гидрогеологические и палеогеографические условия, механизмы образования пещерных отложений. Показано, что карстовый процесс протекал сингенетично с эрозионно-аккумулятивной ритмикой ближайшей реки Пахры. Методом геоморфологической корреляции установлено, что формирование основных объемов пещеры произошло 130–115 тыс. л. н. (МИС 5e; микулинское межледниковье). Выявлено, что через Подмосковную проходил сток из реки Пахра вглубь скального массива с типичными скоростями 1–5 см/с. В интервале 115–40 тыс. л. н. (МИС 5d – сер. МИС 3; первая половина валдайского времени) скорости пещерного потока были существенно ниже (не более 0,1–0,2 см/с); отложилась пачка скрытослоистых алевритистых глин, сносимых преимущественно из вышележащих слоев. Вода покинула пещеру около 40 тыс. л. н., притом по геологическим меркам мгновенно.

Ключевые слова: геоморфология, карст, Московская область, палеогеография плейстоцена, субрельеф

ВВЕДЕНИЕ И ИЗУЧЕННОСТЬ ВОПРОСА

Карст Москвы и Подмосковья исследуется уже более 100 лет, но до сих пор нельзя констатировать высокую степень его изученности. Особенно это касается подземных полостей, которые практически недоступны для прямого изучения и фиксировались в основном по буровым скважинам. К настоящему времени убедительно доказано [Кочев и др., 1991; Аникеев, 2017], что современные карстовые процессы находятся на стадии затухания, либо вообще неактивны, а причиной деформаций дневной поверхности является суффозионный снос тонкодисперсного вещества в раскарстованные полости прошлых эпох. При этом к концу XX в. для территории Москвы и Московской области были установлены гидрогеологические, геоморфологические условия и ведущая роль антропогенного фактора в едином карстово-суффозионном процессе.

Изучение эволюции карста Московского региона осложняется тем, что он относится к закрытому, или русскому, типу. На фоне идущей последние десятилетия смены «главной парадигмы карстологии с преимущественно геоморфологической на гидрогеологическую» [Климчук, Андрейчук, 2010, с. 24] дальше всех в вопросах освещения и классификации карста закрытого типа ушел А.Б. Климчук [Klimchouk, 2005], наработки которого при этом почти не учитывают особенности подмосковного карста. Изученность же субрельефа, или рельефа подземных полостей [Болысов, Неходцев, 2020], и вовсе фрагментарная: подземные карстовые полости Москвы и окрестностей вскрывались несколько

раз при проходке метрополитена [Котлов, 1962; Москва…, 1997]. Отдельные каверны и пещеры протяженностью до 40 м вскрыты в XVII – начале XX в. подземными каменоломнями по бортам долины р. Пахры и ее притоков. Также в Московской области известны несколько пещерок, открывающихся в борта речных долин, крупнейшая из которых – Полушкинская (близ пос. Тучково) – не превышает 30 м в длину [Пещеры…, 2020].

Первые отрывистые сведения о карсте Москвы и Подмосковья стали появляться в работах С.Н. Никитина [1890], А.П. Иванова [1916] и его учеников – А.Н. Сокольского и Б.М. Даньшина [1947]. Интересно описание, сделанное в бассейне р. Битцы: «…на этом участке вследствие сравнительно неглубокого залегания известняков наблюдаются по оврагам и долинам следы провальных ям и характерное поглощение ручьев. Единственным пока случаем (описания пещеры естественного происхождения – *Примеч. авт.*) является открытая О.И. Тихвинским карстовая пещера в известняках близ Красной Пахры» [Даньшин, 1947, с. 78–79].

Начало систематического изучения карста Москвы можно связать с работами Ф.В. Котлова [1962], а центральной части Восточно-Европейской равнины – с широко известными работами Н.А. Гвоздецкого [1954], Г.А. Максимовича [1963], А.Г. Чикишева [1975] и др. Разумеется, этот список нельзя считать исчерпывающим. Особо отметим сравнительно давнюю монографию «Движение земной коры и геологическое прошлое Подмосковья» [Апродов, Апродова, 1963], в которой приведены одни из первых палеореконструкций развития карста в регионе (для долины р. Пахры). Дальнейшее изучение карста Москвы в связи с активизацией провально-просадочных процессов в начале 1960-х гг. приняло яркий инженерно-геологический оттенок и широкий охват, объединило геологов, гидрохимиков, гидрогеологов, геоморфологов из академической среды и многих проектно-изыскательских организаций. Вместе с тем по уже означенной причине это едва ли поспособствовало непосредственному изучению подземных полостей карстового генезиса.

Настоящее исследование посвящено крупнейшей доступной карстовой пещере Московской области (и одной из крупнейших в Центральной России) – Подмосковной, обнаруженной в начале 2020 г. [Гаршин и др., 2020].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пещера Подмосковная вскрыта под д. Новленское (в 3–4 км к северо-востоку от подмосковного города Домодедово) дальним от входа забоем выработки из группы подземных Съяновских каменоломен (рис. 1). Съяновские каменоломни (известные в 1890-х гг. как Новлинские) образовались в результате крестьянского промысла по добыче белого камня. Разработка известняка близ д. Новленское велась с XVII в. по конец XIX в. и завершилась по экономическим причинам [Гаршин и др., 2021]. Общая длина Съяновских каменоломен превышает 20 км [Гаршин, Гаршина, 2016, с. 141], что делает их крупнейшими в Московской области. В морфологическом плане Съяновские каменоломни представляют собой относительно хаотичный лабиринт подземных субгоризонтальных горных выработок (штолен и штреков), преимущественно древовидного рисунка. Обрушений кровли в системе каменоломен относительно немного. Высота кровли в забойных частях достигает 3,5–3,8 м. В настоящее время каменоломня является одним из самых популярных объектов спелеотуризма в Центральной России [Гаршин, Гаршина, 2016].

Съяновскими каменоломнями вскрыт ряд достаточно крупных карстовых полостей. Одна из них, известная также как Лаз Шиза, находится в нижней части монолитной стены забойной камеры в восточной части каменоломен. Этот узкий (30–50 см) труднопроходимый извилистый лаз давно известен туристам и спелестологам (спелестология – раздел спелеологии, изучающий антропогенные подземные макрополости [Гаршин, Гаршина, 2016, с. 137]), периодически проползавшим по нему несколько метров до первого расширения. Однако попыток проникнуть дальше никем не предпринималось: по сообщениям ряда спелеотуристов (И.А. Дымовой, М.Н. Плахова, И.В. Каменева) из-за замытости полости глиной лаз считался тупиковым. По мнению А.М. Пожидаева до начала раскопок продолжение пещеры в ту или иную сторону не было очевидным.

В феврале 2020 г. А.М. Пожидаев прошел Лаз Шизу и, раскопав рыхлые отложения, обнаружил продолжение пещеры, а в 35 м от входа – вертикальный колодец вниз (на тот момент также неизвестный). Первичное исследование и описание пещеры весной 2020 г. проводили члены Ступинского спелеологического общества «Тетис»[1]. Основные работы по раскопке ходов пещеры выполнили А.М. Пожидаев, В.А. Ласкин и Г.В. Творун; топографическую съемку прилегающих к пещере частей Съяновской каменоломни провели Д.И. Гаршин и Ю.В. Гаршина. На этом этапе пещера получила рабочее название «Пожидаевский карст». По заложенным В.А. Неходцевым микрошурфам описаны заполняющие пещеру рыхлые отложения, а по подземным провалам штолен – известняки и залегающие над ними юрские глины и пески, четвертичные аллювиальные пески и суглинки.

[1] С 14.09.2020 г. – спелеоклуб «Тетис».

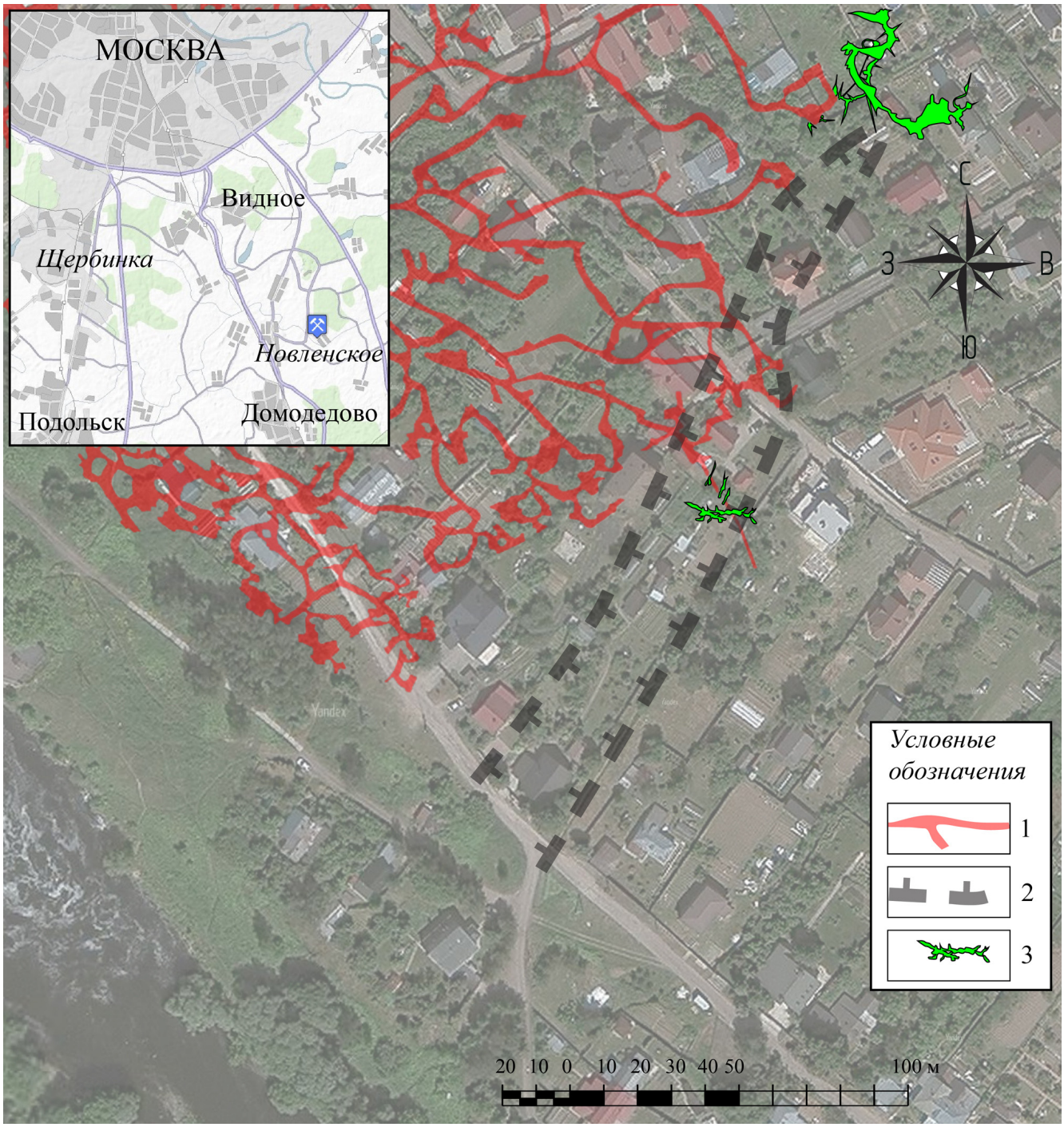

Рис. 1. Местоположение крупнейших картографированных карстовых полостей, вскрытых восточным флангом Сыяновской системы каменоломен.

Полуинструментальная съемка Сыяновской системы каменоломен проведена А.А. Парфеновым и уточнена авторами; съемка пещеры Подмосковной с помощью DistoX2 – А.М. Пожидаевым; съемка прочих карстовых полостей с помощью DistoX2 – В.С. Булатовым. Условные обозначения: 1 – подземные галереи Сыяновских каменоломен; 2 – ложбина стока; 3 – карстовые пещеры

Fig. 1. The location of the largest mapped karst cavities known in the eastern part of the Syanovskaya quarry.

The Syanovskaya quarry topographic survey was conducted by A.A. Parfyonov and improved by the authors; the Podmoskovnaya Cave was surveyed with a DistoX2 device by A.M. Pozhidaev; other cavities were surveyed with a DistoX2 device by V.S. Bulatov. Legend: 1 – underground galleries of the Syanovskaya quarry; 2 – narrow gully; 3 – karst cavities

Параллельно раскопкам А.М. Пожидаев провел первоначальную 3D-съемку пещеры. В основу современной полуавтоматизированной методики топографической съемки подземных полостей заложен комплекс Paperless Caving, который состоит из смартфона с установленным приложением TopoDroid (версия 3.4) и прибора DistoX2. Этот прибор разработан на базе лазерного дальномера фирмы Leica. В него дополнительно установлены акселерометр, модуль беспроводной связи (Bluetooth), датчик Холла, модуль памяти и микропроцессор. Подробное описание применяемой методики подземной топографической съемки и способы уменьшения погрешностей приведены в публикации одного из авторов [Гаршин, 2018]. Для морфометрических измерений также использовался лазерный дальномер Bosch DLE 50 Professional. Погрешность линейных измерений в перечисленных приборах не превышает ±1,5 мм, угловых измерений – 0,5°. В проведении уточняющей топосъемки в мае–июне 2020 г. принимал участие Д.В. Альбов, материалы которого, однако, в настоящей работе не использованы. Информационную поддержку и помощь в обработке материалов перманентно оказывал В.С. Булатов (спелестологическая группа «Летучая мышь»).

В течение лета–осени 2020 г. А.М. Пожидаевым, В.А. Ласкиным и Г.В. Творуном периодически производились работы по поиску продолжения ходов нижнего этажа пещеры. Наиболее перспективным оказалось ее развитие в восточном и юго-восточном направлениях (в сторону реки). Здесь при раскопках завала нижнего этажа А.М. Пожидаеву и Г.В. Творуну осенью 2020 г. удалось проникнуть ниже его пола. Однако на момент подготовки статьи уверенно говорить об обнаружении полноценного третьего этажа преждевременно, поскольку весь восточный фланг пещеры представлен обширным обвальным массивом.

В октябре–ноябре 2020 г. было проведено нивелирное сопоставление и частичная топосъемка карстовых полостей, вскрытых на восточном фланге каменоломни (проводили Д.И. Гаршин, И.А. Дымова, В.А. Неходцев, Г.В. Творун); описаны пещерные отложения с дальнейшей корреляцией с таковыми в Подмосковной. Высотные отметки карстовых полостей были определены единовременно в течение 40 минут с помощью электронного барометра в приборе Garmin GPSMAP 64s и дополнительно уточнены в ходе топографической съемки прибором DistoX2. Погодные условия были выбраны таким образом, что три предшествующих дня на фоне антициклональных условий атмосферное давление не менялось. Кроме того, методом DistoX2 была проведена точная привязка пещеры к поверхности через пройденный в 2010-х гг. штрек в соседнюю Новленскую каменоломню. Сама Новленская каменоломня привязана к геодезическому пункту в д. Новленское через засыпанный вход и горную выработку, выводящую на один из дачных участков. Точность определения местоположения пещеры Подмосковной нами оценивается в ±5 м, высотное положение – ±1 м. Уточненные географические координаты входа в пещеру (из подземной каменоломни): 55,48400695; 37,79511895.

Всеми участниками суммарно совершено более 25 однодневных выездов; проведено две наземные геоморфологические съемки. Для подготовки статьи использованы геологические фондовые материалы, полученные в ФГБУ «Росгеолфонд» (см. список литературы). На момент подготовки статьи раскопки пещеры Подмосковной продолжаются по нескольким направлениям. К ноябрю 2020 г. суммарная протяженность картографированных основных ходов пещеры превысила 190 м (рис. 2), в связи с чем пещера однозначно интерпретирована как крупнейшая известная естественная пещера Московской области и одна из крупнейших – в Центральной России. Консолидированным решением членов исследовательской группы ей присвоено название «Подмосковная», под которым она внесена в Информационно-поисковую систему «Пещеры» (кад. № 5529/3747-2). Для ограничения нежелательного доступа в пещеру вход был законсервирован исследовательской группой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описание пещеры. Пещера находится под тыловой частью левобережной третьей надпойменной террасы р. Пахры на абсолютных высотах 118–121 м. Глубина пещеры относительно поверхности составляет около 18 м. Подмосковная является карстовой пещерой коррозионно-эрозионного генезиса. По условию образования (карстующиеся породы перекрыты бронирующими отложениями), пещера относится к закрытому (русскому) типу карста. Пещеры такого типа в зарубежной литературе, видимо, практически не освещались. Проблемно и однозначное отнесение Подмосковной к одному из эволюционных типов карста, поскольку она одновременно несет черты закрытого (гипогенного), приоткрытого и взрезанного типов [Klimchouk, 2005]. Похоже, что это первая из пещер такого типа, непосредственно посещенная и исследованная в Московском регионе (не считая данных колонкового бурения). Отметим, что на существование аналогичных ей субгоризонтальных пещерных систем, приуроченных к долинам рек, прежде указывали некоторые исследователи [Апродов, Апродова, 1963; Максимович, 1963].

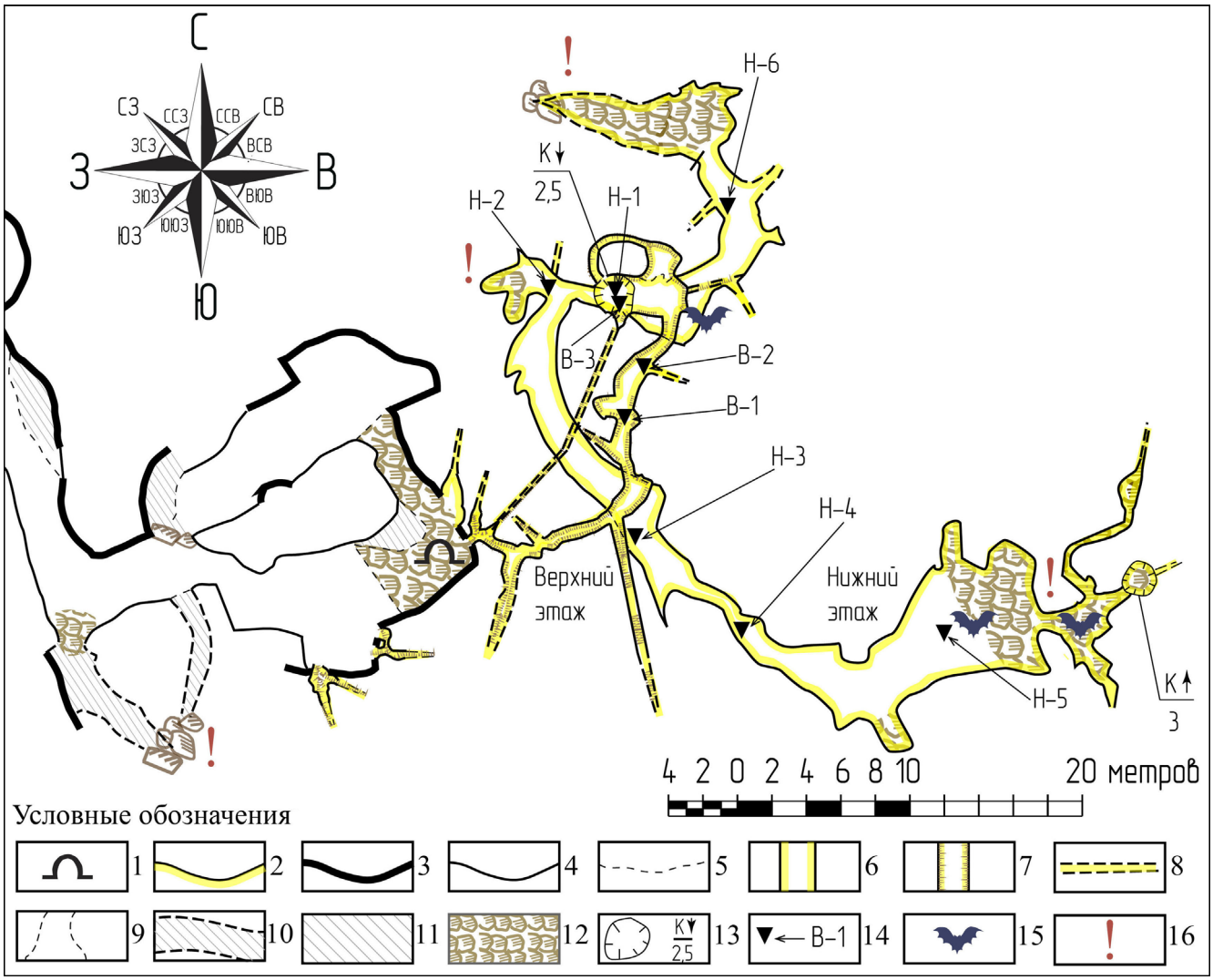

Рис. 2. План пещеры Подмосковной и прилегающих к ней выработок Съяновской системы каменоломен (по состоянию на конец октября 2020 г.).

Съемка инструментальная (DistoX2), абрис глазомерный: А.М. Пожидаев, Д.И. Гаршин, Ю.В. Гаршина, И.А. Дымова; обработка: Д.И. Гаршин. Север географический. Условные обозначения: 1 – вход в пещеру; 2 – границы карстовых полостей; 3 – монолитная стена забоя; 4 – бутовая кладка стен; 5 – границы ниш, перепад уровня пола; 6 – ходы нижнего пещерного этажа; 7 – ходы верхнего пещерного этажа; 8 – трещины, непроходимые лазы; 9 – границы ходов низшего уровня; 10 – лазы в бутовой кладке; 11 – узкие ходы; 12 – завалы и отдельные глыбы; 13 – карстовые колодцы, глубина в метрах; 14 – стратиграфические микрошурфы; 15 – скопление останков летучих мышей; 16 – опасность обвалов

Fig. 2. The plan of the Podmoskovnaya Cave and nearby mine workings of the Syanovskaya quarry (as of late October, 2020).

Topographic survey with a DistoX2 device and field sketching performed by A.M. Pozhidaev, D.I. Garshin, Yu.V. Garshina, I.A. Dymova; processed by D.I. Garshin. North is the geographical direction. Legend: 1 – the cave entrance; 2 – karst cavities; 3 – quarry face; 4 – quarry stone along the quarry faces; 5 – niches in the quarry floor; 6 – the lower cave level; 7 – the upper cave level; 8 – fissures and impassable narrow crevices; 9 – unseen objects; 10, 11 – narrow tunnel in quarry stone; 12 – obstruction and heap of boulders; 13 – shafts, depth in meters; 14 – exploring pits; 15 – bats remains (bones); 16 – danger of collapse

Почти все ходы пещеры наклонены (неравномерно; средние уклоны порядка 3–5%) к северу в соответствии с общим падением пластов и направлением межпластовых трещин, по которым они и заложены. Морфологически пещера является паводковым лабиринтом [Климчук, Андрейчук, 2010]: в плане ее ходы иррегулярны, извилисты, имеется множество узких непролазных ответвлений, иногда ограниченных обвалами. При этом пещерная система линейно вытянута вкрест долине Пахры.

В явном виде выделяются два пещерных этажа, расположенные почти в 3 м один над другим и соединенные воронковидным колодцем диаметром от 50 см в нижней части до 200 см в верхней (рис. 3). Еще один карстовый колодец аналогичных размеров обнаружен в восточной части нижнего этажа, но пройти его пока не удалось, т. к. он полностью

завален обломками известняка, к разбору которых коллектив еще не приступал. Также этажи соединены не до конца сформировавшимся псевдоколодцем в средней части картографированного участка и рядом вертикальных прокарстованных трещин с раскрытием до нескольких сантиметров.

Еще одна более чем 30-метровая пещера обнаружена в 110 м южнее Подмосковной в середине 2010-х гг. при проходке сбойки в соседнюю каменоломню Новленская. Морфология ходов, гипсометрическое положение и субтерральные отложения дают основание полагать, что обе пещеры являются частями единой пещерной системы, заложенной вдоль зоны повышенной трещиноватости известняков. На поверхности над обеими пещерами проходит ложбина стока (шириной до 20 м; глубиной менее 3 м), верховья которой находятся почти над пещерой Подмосковной (см. рис. 1), что указывает на единый литолого-структурный контроль спелеогенеза и рельефообразования на поверхности. В случае вероятного соединения двух пещер ходами малого диаметра суммарная протяженность обнаруженной пещерной системы может достигать 450–500 м. Кроме того, Съяновскими каменоломнями вскрыто еще несколько карстовых полостей различной протяженности и гипсометрически соответствующих двум этажам Подмосковной [Гаршин и др., 2020].

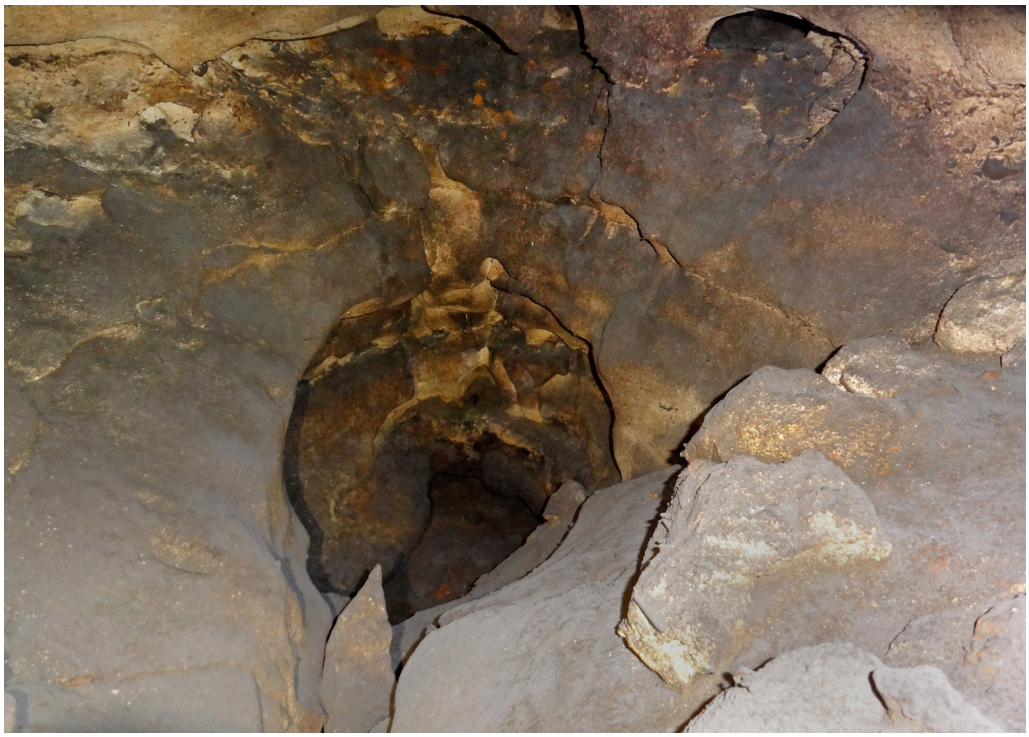

Рис. 3. Карстовый колодец между этажами пещеры. Фотография А.М. Пожидаева

Fig. 3. A karst shaft between the cave levels. Photo by A.M. Pozhidaev

Ширина основных ходов пещеры почти нигде не превышает 1 м; исключения составляют только северная часть Подмосковной с ходами шириной 2–3 м и юго-восточная обрушенная часть (более 6 м). Множественные ответвления и параллельные каналы преимущественно не шире 20–30 см, потому недоступны для прямого изучения. Высота раскарстованных ходов почти повсеместно близка к половине их ширины, однако они замыты рыхлыми отложениями (рис. 4). Заложенные микрошурфы показали, что ложе ходов в основном в 2–3 раза у́же их сводовой части. Мощность пачки рыхлых отложений в основном не превышает 20 см, кроме нескольких конусов выноса на нижнем этаже пещеры (в горловине колодца и под вертикальными карстовыми каналами), что указывает на частичный снос материала с верхнего этажа. Это же подтверждается инвертированностью слоев на нижнем этаже в шурфах Н-1, Н-2, Н-3 (рис. 5 и 6). Случайно обнаруженные переуглубления ложа нижнего этажа также заполнены осадками. В целом рыхлые отложения сформированы *in situ*: они состоят преимущественно из выпавших из свода обломков известняка, останков морских организмов и зерен кварца, сверху перекрытых своего рода маркирующим горизонтом – рыхлыми неплотными алевритистыми глинами, снесенными из вышележащих слоев (подробнее – ниже).

Рис. 4. Замытый основной ход верхнего этажа пещеры. Диаметр транспортного мешка – 22 см.
Фотография В.А. Неходцева

Fig. 4. The main passage of the upper cave level, partially filled with clay. The caving bag diameter is 22 cm.
Photo by V.A. Nekhodtsev

Рис. 5. Шурф В-3. Слоистая пачка водно-механических отложений – преимущественно песчано-дресвяные, оглиненые, состоящие в основном из останков морских организмов. Длина лопатки – 20 см.
Фотография В.А. Неходцева

Fig. 5. The B-3 exploring pit. Laminate stream sediments (coarse sand with clay and remains of marine organisms). The trowel length is 20 cm.
Photo by V.A. Nekhodtsev

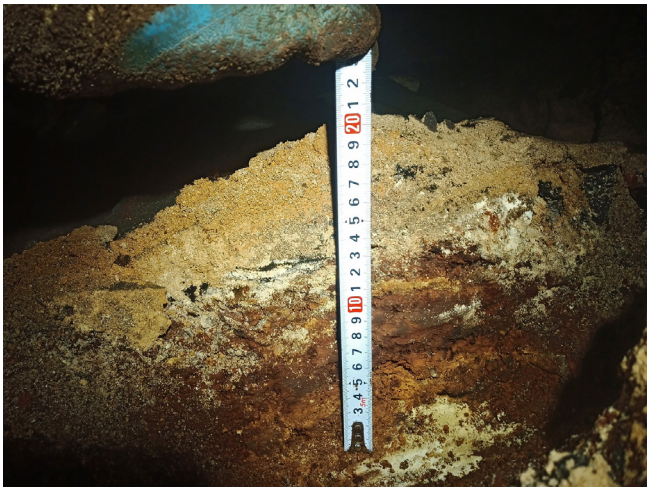

Рис. 6. Шурф Н-3. Поверх ярко-коричневых глин в инвертированном виде переотложен известняково-кварцевый песок с останками морских организмов. Под глинами находятся обвальные отложения ранней стадии формирования пещеры – глыбы с заполнителем.
Фотография А.М. Пожидаева

Fig. 6. The H-3 exploring pit. Limestone-quartz sand with the remains of marine organisms is re-deposited in reverse order over the bright brown clay. Gravity deposits (angular blocks) of the early stage of cave formation are under the clay.
Photo by A.M. Pozhidaev

Отметим наиболее крупные (и широкие) залы нижнего этажа пещеры в северной и восточной частях. Заложенные микрошурфы (Н-5 и Н-6) показали, что мощность пещерных отложений в них достигает 2–2,5 м, но в таких местах они представлены в основном нагромождением глыб известняка, замытого материалом песчано-глинистой и дресвяной размерности. Очевидно, что крупнейшие

залы пещеры являются обвалившейся зоной расконцентрации каналовых структур (вместо одного главного массив прорезали десятки мелких). Соответственно, глыбы известняков – это монолиты нерастворенного между каналами скального массива. Расконцентрация каналов объясняется литолого-структурным контролем: известняки-ракушечники в северной и восточной частях пещеры наиболее высокопористы и выветрелы. Более того, на востоке пещеры в нижней части обвального массива вскрываются ярко-желтые рыхлые известняки подольского горизонта, которые в настоящее время выходят на поверхность в днище долины Пахры, чуть выше ее уреза в нижнем бьефе плотины.

Своды пещеры осложнены множественными карстовыми куполами, количество и размер которых увеличиваются в узлах пересечения трещин в известняковом массиве. Самые крупные купола достигают размеров 50×50 см, а в местах пересечения разнонаправленных трещин уходят вверх на 1,5–3 м.

Геолого-геоморфологические и гидрогеологические условия. Рассматриваемая территория находится в среднем течении р. Пахры (правый приток Москва-реки), урез которой с абсолютной отметкой 116 м в нижнем бьефе плотины у д. Новленское является низшей точкой местности (в верхнем бьефе – 120 м). К северу от д. Новленское на междуречной поверхности находится наивысшая точка – 167 м.

В тектоническом отношении территория расположена в пределах южного крыла Московской синеклизы, на Подольско-Егорьевском выступе (западный склон Токмовского свода), ограниченном с севера Подмосковным, а с юго-запада – Пачелмским авлакогенами (неактивными рифтогенными структурами довендского возраста). Длительное и многоэтапное развитие Московской синеклизы с начала венда привело к накоплению мощного (около 1500 м) чехла различных осадочных пород на исследуемой территорий [Астафьев и др., 2000].

Самые древние из выходящих здесь отложений представлены в основном известняками, доломитами и глинами московского яруса среднего карбона (мячковский и подольский горизонты). Для Южного Подмосковья характерно общее падение коренных пород на северо-восток (1,6 м/км), однако оно осложнено куполообразным Домодедовским поднятием северо-восточного простирания, имеющим овальную форму и размеры 8×3 км. Выражается поднятие в более близком залегании известняков к поверхности. Изучаемая территория находится на восточной оконечности структуры, падение слоев на ее крыльях достигает 6–6,5 м/км [Шик и др., 1964, с. 181]. Верхнюю часть мячковского горизонта прорезают штольни подземных Съяновских каменоломен и вскрытые ею карстовые каверны и пещеры. Мячковские отложения (домодедовской и коробчеевской свит) представлены преимущественно белыми чистыми органогенными (фузулинидово-криноидными) известняками, местами переполненными иглами морских ежей, раковинами хористит (брахиоподы) и останками другой фауны. Собственно пещера Подмосковная в явном виде фациально приурочена к переполненным фауной известнякам-ракушечникам: в ближайших выработках Съяновской каменоломни наблюдается значительно меньшее количество ископаемых останков, а известняк значительно плотнее.

Кровля известняков крайне неровная в связи с развитием преимущественно флювиального и карстового доюрского рельефа [Иксанова, 2005]. Окрестности д. Новленское расположены в пределах субгоризонтального доюрского междуречья, перекрытого на севере плотными юрскими глинами (келловейский и оксфордский ярусы), песками (волжский ярус) и четвертичными моренными отложениями (днепровского и московского возраста) [Шик и др., 1964]. Обследование обвалившихся сводов галерей каменоломни (с вывалами вышележащих рыхлых пород) показало, что в 1 м над верхним этажом пещеры Подмосковной находится 1,5–2-метровая толща выветрелых сильно кавернозных известняков со следами ожелезнения и новообразований – предположительно слабо развитая кора выветривания (до)батского возраста. Выше залегают нерасчлененные келловей-оксфордские черные юрские глины. Вскрытые каменоломней в 150 м западнее карстовые полости, гипсометрически соответствующие верхнему этажу пещеры Подмосковной, показали, что источником сноса заполняющих пещеры ярко-коричневых глин является 2-метровый слой кровли известняков (кора выветривания). Там же встречены мощные (до 60 см) шлейфы сноса перемытых черных юрских глин, которые в Подмосковной наблюдаются фрагментарно.

В рельефе территории четко выражен долинный зандр (fQ_2^{ms}) (полого наклонная площадка с абсолютными высотами 139–146 м), к югу и юго-востоку переходящий через уступ в субгоризонтальную поверхность третьей надпойменной террасы р. Пахры.

Современный левобережный долинный комплекс Пахры у д. Новленское представлен двумя цокольными террасами и фрагментом низкой поймы (рис. 7). Ввиду выхода к поверхности среднекаменноугольных скальных пород первая надпойменная терраса и высокая пойма на левобережье не сформированы (в отличие от правобережья); фрагментарно распространен бечевник. Борт долины осложнен оползнями глубокого заложения и суще-

ственно преобразован карьерными разработками, припортальными выемками и провалами подземных Съяновских каменоломен.

В настоящее время в пределах толщи коренных пород от уреза реки до кровли юрских глин, соответственно, и в пещере, и в Съяновских каменоломнях не развит горизонт подземных вод. Колодцами вскрыты надъюрские и надморенные горизонты грунтовых вод, из которых местами вода фильтруется в каменоломни. Фрагментарно развита верховодка.

Реконструкция истории развития пещеры. При изучении карста большое значение имеет определение его возраста, однако универсальных прямых методов определения возраста пещер до сих пор не существует [Дублянский, Дублянская, 1993, с. 100]. Более того, до сих пор в карстологии нет общепринятой трактовки понятия «возраст пещеры». Авторы, вслед за Г.А. Максимовичем, под возрастом пещеры понимают возраст наиболее значительных ходов (хотя отдельные участки могут находиться на разных стадиях развития и иметь неодинаковый возраст). Казалось бы, отсутствие спелеотем и формирование рыхлых пещерных отложений *in situ* лишают возможности датирования методами склерохронологии [Spötl, Boch, 2019] или по наземным космогенным нуклидам [Häuselmann et al., 2020]. С другой стороны, это прямо говорит об относительной молодости пещеры: отсутствует заполнение каверн халцедоном, в рыхлых пещерных отложениях нет следов замещений, окремнения, цементации, стилолитизации и иных вторичных изменений. В многочисленных же описаниях доюрского и доплейстоценового карста окрестностей Москвы обязательно указывается на вторичную проработку каверн и/или скального массива карбонатов [Апродов, Апродова, 1963; Шик и др., 1964; Кабанов, 2000; Иксанова, 2005]. Поэтому в первом приближении пещеру Подмосковную следует датировать как четвертичную.

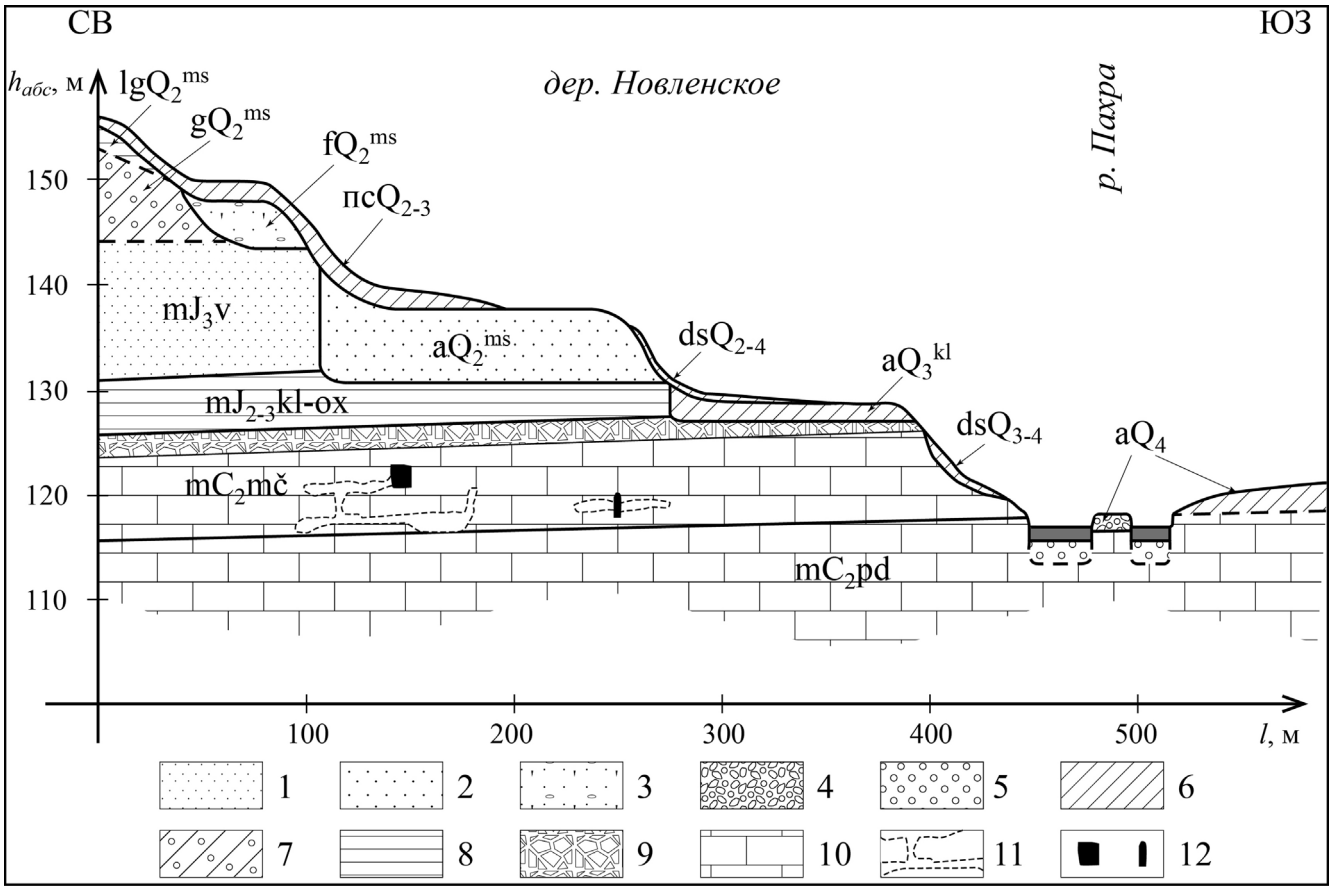

Рис. 7. Строение левого борта долины р. Пахры в створе пещеры Подмосковной.
Условные обозначения: 1 – песок мелкий; 2 – песок средний; 3 – песок крупный с гравием; 4 – валуны с гравием; 5 – валуны с галькой; 6 – суглинок; 7 – суглинок валунный (морена); 8 – глина; 9 – известняк кавернозный, выветрелый до глины (кора выветривания); 10 – известняки с прослоями доломитов; 11 – карстовые пещеры; 12 – подземные галереи Съяновских каменоломен

Fig. 7. The cross-section of the left slope of the Pakhra River valley.
Legend: 1 – fine sand; 2 – medium sand; 3 – coarse sand with gravel; 4 – boulders with gravel; 5 – boulders with pebble; 6 – loam; 7 – boulder clay and loam (moraine); 8 – clay; 9 – cavernous limestone with brown clay (weathering crust); 10 – limestone with dolomite interlayers; 11 – karst caves; 12 – mine workings of the Syanovskaya quarry

Наиболее вероятные рубежи эволюции пещеры Подмосковной установлены косвенными методами: по анализу палеогеографической обстановки и с помощью приемов геоморфологической корреляции (особенно – по сопоставлению сингенетичных форм). К настоящему времени устоялась идея о синхронности образования горизонтальных карстовых пещер и речных террас того же гипсометрического уровня, зародившаяся в конце XIX – начале XX в. с работами Ф. Пошепного, И. Цвийича, Э.А. Мартеля и, особенно, А.Е. Ферсмана. В дальнейшем корреляция горизонтальных карстовых систем и речных террас была окончательно оформлена как методический прием Н.А. Гвоздецким [1954], Г.А. Максимовичем [1963], Н.Ш. Ширинovым [1966] и др. В работе В.А. Апродова и А.А. Апродовой [1963] также указано на синхронность образования карстовых горизонтов и террас в долине р. Пахры, однако без подробностей.

Основное необходимое условие образования при- или внутридолинной горизонтальной карстовой пещеры – сравнительно стабильное высотное положение реки (в нашем случае – Пахры), с которой гидравлической связью обладал горизонт трещинно-карстовых подземных вод [Audra et al., 2006]. При этом, исходя из типичных скоростей растворения известняка и размеров ходов пещеры Подмосковной, продолжительность стабильного гипсометрического положения Пахры должна была составлять порядка $n \times 10^4$ лет. Несмотря на наличие двух этажей в пещере Подмосковной, мы признаем их одновозрастность, поскольку разница между ними по высоте составляет всего 2,5 м, а соединены они хорошо разработанными карстовыми колодцами. Этажное строение пещеры в данном случае обусловлено близким положением межпластовых трещин, по которым шло растворение известняка, и литологическими особенностями массива известняков, но не связано с вертикальными тектоническими движениями или циклами врезания рек, как это обычно бывает при формировании более крупных многоэтажных пещерных систем.

Подмосковная сформирована во фреатических условиях, но не под руслом реки, т. к. пещера в явном виде ориентирована перпендикулярно реке и перекрыта заведомо более древними отложениями 3 НПТ. Основные ходы пещеры расположены на абсолютных отметках около 118–121 м, что гипсометрически соответствует (см. рис. 7) подошве аллювия 2 НПТ (так называемая зона горизонтальной циркуляции). Напомним также, что отложения каменноугольного периода и сама пещера характеризуются падением от русла реки на север. Если мысленно экстраполировать на юг этажи Подмосковной в соответствии с их наклоном, то они бы находились в осевой части долины на абсолютных высотах 119,5–122,5 м. Отметим, что на рассматриваемом участке Пахры мощность аллювия цокольных террас существенно снижена. Например, выше г. Домодедово (9 км к западу от д. Новленское) установленная по скважинам мощность аллювия аккумулятивной 2 НПТ Пахры составляет 13–18 м [Шик и др., 1961]. Учитывая сказанное, образование пещеры Подмосковной хроностратиграфически связано с формированием 2 НПТ р. Пахры.

Поскольку датировать основные этапы эволюции пещеры Подмосковной методами четвертичной геохронологии не представляется возможным, авторы провели их корреляцию с выделенными А.В. Панины эрозионно-аккумулятивными, или флювиальными, макро- и мезоритмами [Панин, 2015]. Также (в отсутствие надежных абсолютных дат по террасовому комплексу Пахры) мы предполагаем синхронное развитие долин Пахры и расположенной на 30 км южнее Протвы (в районе г. Боровск) ввиду их предельного подобия (морфометрические и гидрологические характеристики, направление течения, геолого-тектонические условия, расположение вдоль краевой части московского оледенения). Возраст формирования врезов и террас долины Протвы установлен методами оптически стимулированной люминесценции, радиотермолюминесценции и радиоуглеродным [Панин, 2015; Антонов и др., 2019].

Нами выделены следующие этапы эволюции пещеры Подмосковной.

Этап I. Зарождение карстовых протоканалов могло начаться во время инстративной фазы [врезания] позднемосковско-раннесредневалдайского макроритма (здесь и далее названия ритмов и их абсолютный возраст по [Панин, 2015]) в московское позднеледниковье в интервале от 150 до 130 тыс. л. н. (конец МИС 6). Переуглубление долинного вреза этого времени связано одновременно и с гляциоизостатическим поднятием в краевой части московского оледенения, и с эпохой мощного стока [Антонов и др., 2019]. Врезание Пахры в створе д. Новленское из-за наклона толщ известняков шло преимущественно от правого борта к левому [Апродов, Апродова, 1963]. Тогда же, видимо, были заложены вертикальные трещины бортового отпора, которые во множестве вскрыты Съяновскими каменоломнями; многие из них раскарстованы.

Этап II. Наиболее активное растворение известняков и формирование основного объема пещеры с образованием крупнообломочных отложений в ней имели место в перстративную фазу [стабилизации] развития долины Пахры в интервале 130–115 тыс. л. н. (МИС 5e; микулинское межледниковье). При этом через Подмосковную проходил сток непосредственно из реки, о чем свидетельствует

и наклон ходов пещеры, и характер расположения в ней слоев рыхлых отложений. Заметим, что подобное гидрогеологическое явление скорее не характерно для пределов Московской синеклизы, хотя и описывалось прежде [Чикишев, 1978; Антроповский, Петров, 2002]. В основных ходах пещеры нижняя толща дресвяно-песчаных пещерных отложений с обильным количеством выпавших из свода раковин и игл ежей указывает на сравнительно высокую скорость проходящего карстового потока (1–5 см/с и более). Выше отмечено, что растворение известняка по нескольким параллельным каналам привело уже на этой стадии к образованию 1,5–2-метровой обвальной толщи в северной и восточной частях пещеры. Ускорению карстового процесса способствовало повышенное содержание растворенных в речных водах органических кислот.

Этап III. Конструктивная фаза [аккумуляция] развития долины Пахры продолжалась в раннем и первой половине среднего валдая в интервале от 115 до 40 тыс. л. н. (МИС 5d – сер. МИС 3) и завершала формирование поверхности современной второй надпойменной террасы. По мере заполнения долинного вреза аллювием река, видимо, уходила все дальше от левого борта [Апродов, Апродова, 1963]. Это (или тампонирование аллювием входной зоны пещерного горизонта) привело к затуханию гидравлической связи с руслом Пахры и падению скорости пещерного потока до минимальных (не более 0,1–0,2 см/с) или нулевых значений. При таком застойном режиме в Подмосковной накопились коричневые и алевритистые глины, сносимые из вышележащей батской коры выветривания. Аналогичные следы сноса морских юрских глин обнаружены в других карстовых полостях, вскрытых Съяновскими каменоломнями. Коричневые глины в разрезе Н-5 проявляют неявную (вплоть до скрытой) слоистость, которая пока не анализировалась.

На данном этапе Подмосковная продолжала находиться в пределах фреатической зоны (т. е. ниже постоянного уровня карстовых вод, которые заполняли пещеру целиком и под давлением). На это указывают встреченные на нижнем этаже следы фреатических вихрей – округлые замкнутые углубления на поверхности слоя коричневых глин, расположенные под вертикальными трещинами и заведомо не связанные с дальнейшим размывом.

Этап IV. На последней стадии активной «жизни» пещеры вода покидала полость, притом стекала она также от реки (на север), что подтверждается стратиграфическими разрезами, заложенными в нескольких точках пещеры (см. рис. 2). Мощность отложений нижнего этажа увеличивается в нижних частях карстовых колодцев с юга на север. Верхний горизонт отложений – ярко коричневые глины – на обоих этажах смыт в том же направлении, в южной части размыт по бокам, хотя подошва глин ровная и горизонтальная (разрез В-1), а в северной, наоборот, отсутствует по бокам на поверхности, заполняя по центру углубление в разрезе В-3 (см. рис. 5).

Разрезы Н-1 и Н-2 и ряд ответвлений от основных ходов показывают, что на нижнем этаже находились основные точки ухода стока из пещеры; рыхлые отложения здесь образуют зеркально отраженные явно перемытые пачки отложений верхнего этажа. Уход воды из пещеры связан с самым началом нового – текущего – эрозионно-аккумулятивного макроритма, инстративная фаза которого пришлась на вторую половину среднего валдая (~40–28 тыс. л. н., конец МИС 3). Судя по частичному размыву пещерных отложений, уход воды из пещеры был явно стремительным, а следов существования вадозных условий в пещере почти не наблюдается. Более того, в разрезах нижнего этажа выделяется лишь один цикл инвертированного осадконакопления, что указывает на разовый уход воды из пещеры около 40 тыс. л. н., больше она не возвращалась.

Этап V (современный). В настоящее время пещера не затапливается. Из динамичных процессов внутри Подмосковной можно отметить сравнительно свежие гравитационные процессы – выпадения блоков известняка из потолка пещеры и образование небольших завалов в восточной части нижнего этажа. Видимо, основной причиной этих процессов является дачное строительство в д. Новленское и повышение общей вибрационной нагрузки на толщу известняков. Пещера сравнительно хорошо проветривается за счет естественного движения воздуха, направление которого, по нашим наблюдениям, регулярно меняется. С конца XIX в. вся поверхность полости (кроме свода) была покрыта, как и галереи Съяновских каменоломен, сажей и пылью.

В нескольких местах в Подмосковной обнаружены скопления останков («кладбища») летучих мышей (черепа и множество костей), идентифицированные по краинологическим параметрам как *Plecotus auritus* (бурый ушан). Учитывая глубокое заложение пещеры, отсутствие естественных входов в нее и крайне высокую скорость разложения костных останков летучих мышей [Росина, 2004], можно датировать находку не ранее конца XIX в. Видимо, пещера Подмосковная за счет воздухообмена стала своего рода природной ловушкой, в которой рукокрылые «заблудились», стремясь выбраться из каменоломен на поверхность. В настоящее время рукокрылые здесь встречаются крайне редко, места их ночевок (зимовок) неизвестны.

ВЫВОДЫ

Пещера Подмосковная, открытая в феврале 2020 г. А.М. Пожидаевым, является самой протяженной (более 190 м) естественной пещерой Московской области. Она также является частью вскрытой подземными Съяновскими каменоломнями крупной системы карстовых полостей, которые формируют единый горизонт карстования на левобережье р. Пахры.

Пещера относится к сравнительно редкому и малоизученному карсту закрытого (русского) типа: карстующиеся известняки перекрыты преимущественно водоупорными юрскими глинами.

В основном своем объеме пещера Подмосковная сформирована в интервале 130–115 тыс. л. н., а часть субтерральных отложений – слоистые глины – были отложены 115–40 тыс. л. н. При этом через пещеру все время ее активного существования проходил сток из р. Пахры. Карстовый процесс прекратился около 40 тыс. л. н., и с тех пор пещера не затапливается.

Благодарности. Авторы выражают признательность В.С. Булатову за помощь в обработке полевых материалов и консультации при подготовке рукописи. Авторы подчеркивают особый вклад В.А. Ласкина и Г.В. Творуна в раскопки и исследование пещеры Подмосковной. Исследование проводится в рамках темы госзадания № 121040100323-5 «Эволюция природной среды в кайнозое, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.

Антонов С.И., Гунова В.С., Рычагов Г.И., Судакова Н.Г. Развитие долины р. Протвы в позднем неоплейстоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 4. С. 88–99.

Антроповский В.И., Петров О.А. Морфология и русловые процессы рек в районах распространения карста // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2002. Т. 2. № 4. С. 145–152.

Апродов В.А., Апродова А.А. Движения земной коры и геологическое прошлое Подмосковья. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963. 267 с.

Астафьев Д.А., Шеин В.С., Алипова Н.Ю., Чагаев А.Я. Вопросы дальнейшего изучения Московской синеклизы // Геология нефти и газа. 2000. № 6. С. 51–57.

Болысов С.И., Неходцев В.А. Концепция субрельефа – рельефа подземных полостей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 2. С. 13–22.

Гаршин Д.И. Прибор DistoX и современная методика топографической съемки подземных полостей // Оки связующая нить: сб. материалов XI региональной научно-практической конференции (Ступино, 19 января 2018 г.). Ступино, 2018. С. 36–52.

Гаршин Д.И., Гаршина Ю.В. Стихийный спелеотуризм в Подмосковье // Туризм в глубине России: сб. трудов IV Всероссийского научного семинара (24–28 июля 2016 г.). Пермь: ПГНИУ, 2016. С. 135–150.

Гаршин Д.И., Гаршина Ю.В., Долотов Ю.А., Неходцев В.А. Подземные Съяновские каменоломни (Московская область) // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2021. № 1. С. 145–162. DOI: 10.37724/RSU.2021.70.1.015.

Гаршин Д.И., Гаршина Ю.В., Неходцев В.А., Пожидаев А.М. Пещера Подмосковная, вскрытая Съяновской системой каменоломен // Пещеры. Вып. 43. Пермь: ПГНИУ; ГИ УрО РАН. 2020. С. 17–26.

Гвоздецкий Н.А. Карст: Вопросы общего и регионального карстоведения. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Географгиз, 1954. 352 с.

Даньшин Б.М. Геологическое строение и полезные ископаемые Москвы и окрестностей. М.: Изд-во МОИП, 1947. 305 с.

Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Пещеры Крыма // Пещеры. 1993. Вып. 23–24. С. 93–101.

Иванов А.П. Артезианские воды г. Москвы. М.: Гор. тип., 1916. 32 с.

Иксанова Е.А. Вклад докайнозойского карбонатного карста в развитие современных просадочных процессов в г. Москве: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2005. 155 с.

Кабанов П.Б. Событийная стратиграфия пограничного интервала среднего и верхнего карбона Подмосковья: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2000. 266 с.

Климчук А.Б., Андрейчук В.Н. О сущности карста // Спелеология и карстология. 2010. № 5. С. 22–47.

Котлов Ф.В. Изменение природных условий территории Москвы под влиянием деятельности человека и их инженерно-геологическое значение. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 263 с.

Кочев А.Д., Зайянц И.Л., Мамонтов В.В. Отчет по изучению инженерно-геологических условий на участках возможного проявления карстово-суффозионных процессов в западной части Москвы (зона А). М.: Гидроспецгеология, 1991. 499 с. (Инв. № 459287 «Росгеолфонд»).

Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т. 1: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское кн. изд., 1963. 444 с.

Москва. Геология и город / под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева, РАН, Институт геоэкологии; Мосгоргеотрест. М.: Московские учебники и Картолитография, 1997. 398 с.

Никитин С.Н. Каменноугольные отложения Подмосковного края и артезианские воды под Москвою // Тр. Геол. ком. 1890. Т. 5. № 5. С. 1–182.

Панин А.В. Флювиальное рельефообразование на равнинах умеренного пояса Евразии в позднем плейстоцене – голоцене: дис. … док-ра геогр. наук. М., 2015. 457 с.

Росина В.В. Голоценовые рукокрылые (Chiroptera, Mammalia) и особенности их тафономии в услови-

ях пещер Северо-Западного Алтая // Экосистемные перестройки и эволюция биосферы. М.: ПИН РАН, 2004. Вып. 6. С. 110–118.

Чикишев А.Г. Географические условия развития карста. М.: Изд-во МГУ, 1975. 114 с.

Чикишев А.Г. Карст Русской равнины. М.: Наука, 1978. 192 с.

Шик Е.М., Васькова С.С., Концова В.К. Отчет о геолого-гидрогеологической съемке масштаба 1:50 000, проведенной Михневской партией на территории листов: N-37-16-Г; N-37-28-Б; N-37-28-Г (Московская область) в 1962–1964 гг. М.: ГУЦР ГСЭ, 1964. 1286 с. (Инв. № 259208 «Росгеолфонд»).

Шик Е.М., Концова В.К., Васькова С.С., Пирогова Е.М., Рождественская К.К. Отчет о геологической съемке масштаба 1:50 000, проведенной Подольской геолого-гидрологической партией на территории листов N-37-15-Г; N-37-16-В; N-37-27-Б; N-37-28-А. М.: ГУЦР ГСЭ, 1961. 2170 с. (Инв. № 234481 «Росгеолфонд»).

Ширинов Н.Ш. Геоморфологическая датировка возраста Азыхской пещерной стоянки палеолитического человека // Известия АН АССР. Серия наук о Земле. 1966. № 5. С. 67–73.

Audra Ph., Bini A., Gabrovšek F., Häuselmann P., Hobléa F., Jeannin P.-Y., Kunaver J., Monbaron M., Šušteršič F., Tognini P., Trimmel H., Wildberger A. Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2006, no. 50(2), p. 153–176.

Häuselmann P., Plan L., Pointner P., Fiebig M. Cosmogenic nuclide dating of cave sediments in the Eastern Alps and implications for erosion rates, *International Journal of Speleology*, 2020, no. 49, p. 107–118, DOI: 10.5038/1827-806X.49.2.2303.

Klimchouk A. Subsidence hazards in different types of karst: evolutionary and speleogenetic approach, *Environmental Geology*, 2005, no. 48, p. 287–295, DOI: 10.1007/s00254-005-1275-5.

Spötl C., Boch R. Uranium series dating of speleothems, *Encyclopedia of Caves*, W. White, D. Culver, T. Pipan (eds.), Elsevier, 2019, p. 1096–1102.

Электронный ресурс

Пещеры. Информационно-поисковая система. URL: https://speleoatlas.ru (дата обращения 12.11.2020).

Поступила в редакцию 04.12.2020
После доработки 20.02.2021
Принята к публикации 18.03.2021

THE STRUCTURE AND THE EVOLUTION OF THE PODMOSKOVNAYA CAVE

V.A. Nekhodtsev[1], D.I. Garshin[2], A.M. Pozhidaev[3]

[1] *Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography*
[2] *The Moscow City Department of the Russian Geographical Society*
[2, 3] *Tethys Caving Club, Stupino*

[1] *Ph.D. candidate; e-mail: baban.n@mail.ru*
[2] *Head of the Club; e-mail: sso.tetis@gmail.com*
[3] *e-mail: andr.pozhidaeff@yandex.ru*

In February 2020 a new Podmoskovnaya karst cave was discovered near the Novlenskoe village to the south from Moscow. The cave is considered to be the longest natural cave in the Moscow Region and among the longest ones in Central Russia. The specific value of the cave is its type and origin, i.e. rare and insufficiently explored Russian karst type (also known as closed, deep-seated, or confined karst). The laying depth of the cavity is 18 m; it lies in the Middle Carboniferous limestones, covered by Jurassic clay. The results of the cave examination performed with the manual widening of underground passages, are presented, namely the description of the cave and its sediments, its topographic plan and surface reference with accuracy about 5 m spatially and 1 m vertically. The Podmoskovnaya cave is a typical "flood labyrinth" (irregular in the plan) and consists of two cave levels connected by karst wells 2,5–3 m high. The length of already mapped passages is more than 190 m. Our investigation also reviews the detailed history of cave formation, i.e. hydrological and paleogeographic conditions, and specific features of cave sedimentation. Karst processes in the Podmoskovnaya cave were syngenetic with incision/aggradation rhythms. The cave age was determined using the geomorphologic correlation; the main cavities were formed about 115–130 ka BP (MIS 5e; the Eemian). The Pakhra River discharged through the Podmoskovnaya Cave into the depths of a rock massif with typical velocity of 1–5 cm per second. About 40–115 ka BP (MIS 5d – middle of MIS 3; the first half of the Last Glacial Period) the velocity of underground flow was significantly lower (about 0.1–0.2 cm per sec). This resulted in the deposition of laminated silty clay, which was mostly taken from the upper layers. The water left the cave about 40 ka BP, almost instantly in geological terms.

Keywords: geomorphology, karst, Moscow oblast, Pleistocene paleogeography, subrelief

Acknowledgments. The authors are grateful to V.S. Bulatov for his assistance in processing field materials and preparing the manuscript. The authors particularly appreciate the contribution of V.A. Laskin and G.V. Tvorun

to excavations and research of the Podmoskovnaya Cave. The work was carried out under the State Research Task 121040100323-5 “Cenozoic evolution of the natural environment, the relief dynamics, geomorphologic hazards and risks of nature management”.

REFERENCES

Anikeev A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh raionakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Sinkholes and subsidences in karst areas: mechanics, prediction, and risk evaluation], Moscow, Peoples' Friendship University of Russia Publ., 2017, 328 p. (In Russian)

Antonov S.I., Gunova V.S., Rychagov G.I., Sudakova N.G. Razvitie doliny r. Protvy v pozdnem neopleistotsene [The Protva river valley evolution in the Late Neopleistocene], *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 4, p. 88–99. (In Russian)

Antropovskii V.I., Petrov O.A. Morfologiya i ruslovye protsessy rek v raionakh rasprostraneniya karsta [Morphology and river-bed formation processes of rivers in areas of karst spread], *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*, 2002, no. 4, p. 145–152. (In Russian)

Aprodov V.A., Aprodova A.A. *Dvizheniya zemnoi kory i geologicheskoe proshloe Podmoskovya* [Movements of the Earth's crust and the geological past of the Moscow region], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1963, 267 p. (In Russian)

Astafiev D.A., Shein V.S., Alipova N.Yu., Chagaev A.Ya. Voprosy dal'neishego izucheniya Moskovskoi sineklizy [Questions of further study of the Moscow syneclise], *Geologiya nefti i gaza*, 2000, no. 6, p. 51–57. (In Russian)

Audra Ph., Bini A., Gabrovšek F., Häuselmann P., Hobléa F., Jeannin P.-Y., Kunaver J., Monbaron M., Šušteršič F., Tognini P., Trimmel H., Wildberger A. Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2006, no. 50(2), p. 153–176.

Bolysov S.I., Nekhodtsev V.A. Kontseptsiya subreliefa – rel'efa podzemnykh polostei [Concept of subrelief – relief of the underground cavities], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 2, p. 13–22. (In Russian)

Chikishev A.G. *Geograficheskie usloviya razvitiya karsta* [Geographical Conditions of Karst Evolution], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1975, 114 p. (in Russian)

Chikishev A.G. *Karst Russkoi ravniny* [Karst of the Russian Plain], Moscow, Nauka Publ., 1978, 192 p. (in Russian)

Danshin B.M. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye Moskvy i okrestnostei* [Geology and mineral resources of Moscow and its vicinity], Moscow, Moscow Society of Naturalists Publ., 1947, 305 p. (in Russian)

Dublyanskij V.N., Dublyanskaya G.N. Crimea caves, *Peshchery* [Caves], 1993, vol. 23–24, p. 93–101. (In Russian)

Garshin D.I. [The DistoX device and modern methods for the topographic surveying of underground cavities], *Oki svyazuyushchaya nit': sb. materialov XI regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Stupino, 19 yanvarya 2018 g.)* [The Oka River binding thread: Proceedings of the XI regional scientific and practical conference (Stupino, January 19, 2018)], Stupino, 2018, p. 36–52. (In Russian)

Garshin D.I., Garshina Yu.V. [Unofficial speleotourism in Moscow region], *Turizm v glubine Rossii: sbornik trudov IV Vserossiiskogo nauchnogo seminara (24–28 iyulya 2016 g.)* [Tourism in the upcountry of Russia: Proceedings of the IV all-Russian scientific seminar (July 24–28, 2016)], Perm, Perm State University 2016, p. 135–150. (In Russian)

Garshin D.I., Garshina Yu.V., Dolotov Yu.A., Nekhodtsev V.A. Podzemnye Syanovskie kamenolomni (Moskovskaya oblast) [Syanovskaya underground quarry (Moscow region)], *The Bulletin of Ryazan State University named for S.A. Yesenin*, 2021, no. 1 (70), p. 145–162, DOI: 10.37724/RSU.2021.70.1.015. (In Russian)

Garshin D.I., Garshina Yu.V., Nekhodtsev V.A., Pozhidaev A.M. Peshchera Podmoskovnaya, vskrytaya S"yanovskoi sistemoi kamenolomen [Podmoskovnaya cave, discovered in Syanovskaya quarry], *Peshchery* [Caves], 2020, vol. 43, p. 17–26. (In Russian)

Gvozdetsky N.A. *Karst: Voprosy obshchego i regional'nogo karstovedeniya* [Karst: Issues of general and regional karst studies], Moscow, Geografgiz Publ., 1954, 352 p. (In Russian)

Häuselmann P., Plan L., Pointner P., Fiebig M. Cosmogenic nuclide dating of cave sediments in the Eastern Alps and implications for erosion rates, *International Journal of Speleology*, 2020, no. 49, p. 107–118, DOI: 10.5038/1827-806X.49.2.2303.

Iksanova E.A. *Vklad dokajnozojskogo karbonatnogo karsta v razvitie sovremennyh prosadochnyh processov v g. Moskve* [Influence of Pre-Cenozoic carbonate karst on the evolution of modern subsidence processes in Moscow], Thesis Ph.D. in Geography, Moscow, 2005. 155 p. (In Russian)

Ivanov A.P. *Artezianskie vody g. Moskvy* [Moscow artesian aquifers], Moscow, Gorodskaya tipografiya Publ., 1916, 32 p. (In Russian)

Kabanov P.B. *Sobytiinaya stratigrafiya pogranichnogo intervala srednego i verkhnego karbona Podmoskov'ya* [Event stratigraphy of the boundary interval of Middle and Upper Carboniferous in the Moscow region], Thesis PhD in Geography, Moscow, 2000, 266 p. (In Russian)

Klimchouk A. Subsidence hazards in different types of karst: evolutionary and speleogenetic approach, *Environmental Geology*, 2005, no. 48, p. 287–295, DOI: 10.1007/s00254-005-1275-5.

Klimchouk A.B., Andrejchuk V.N. O sushchnosti karsta [To the essence of karst], *Speleology and Karstology*, 2010, no. 5, p. 22–47. (In Russian)

Kochev A.D., Zajyanc I.L., Mamontov V.V. *Otchet po izucheniyu inzhenerno-geologicheskih uslovij na uchastkah vozmozhnogo proyavleniya karstovo-suffozionnyh processov v zapadnoj chasti Moskvy (zona A)* [Research report of geo-engineering conditions of possible karst-suffusion sites in the western part of Moscow (zone A)], Moscow, Gidrospecgeologiya Publ., 1991, 499 p. (In Russian)

Kotlov F.V. *Izmenenie prirodnyh uslovij territorii Moskvy pod vliyaniem dejatel'nosti cheloveka i ikh inzhenerno-geologicheskoe znachenie* [Changes of natural conditions

of Moscow area under the anthropogenic influence and their engineering significance], Moscow, Academy of Sciences of the Soviet Union Publ., 1962, 263 p. (In Russian)

Maksimovich G.A. *Osnovy karstovedeniya, t. 1, Voprosy morfologii karsta, speleologii i gidrogeologii karsta* [The foundations of karst science, vol. 1, Issues of karst morphology, speleology and karst hydrogeology], Perm, Perm book publishing, 1963, 444 p. (In Russian)

Moskva. Geologija i gorod [Moscow. Geology and the city], V.I. Osipov, O.P. Medvedev (eds.), Moscow, Moskovskie uchebniki i kartolitografija Publ., 1997, 398 p. (In Russian)

Nikitin S.N. Carboniferous deposits of Moscow region and artesian aquifers near Moscow, *Trudy Geologicheskogo komiteta* [Proceedings of the Geological Committee], 1890, vol. 5, no. 5, p. 1–182. (In Russian)

Panin A.V. *Flyuvial'noe rel'efoobrazovanie na ravninakh umerennogo poyasa Evrazii v pozdnem pleistotsene – golotsene* [Fluvial processes in the plains of Eurasia temperate zone during the Late Pleistocene and the Holocene], Thesis D.Sc. in Geography, Moscow, 2015, 457 p. (In Russian)

Rosina V.V. Holocene bats (Chiroptera, Mammalia) and their taphonomic peculiarities in the caves of North-Western Altai, *Ekosistemnye perestroiki i evolyutsiya biosfery* [Ecosystem restructuring and the evolution of biosphere], Moscow, Borissiak Paleontological Institute Publ., 2004, vol. 6, p. 110–118. (In Russian)

Shik E.M., Kontsova V.K., Vaskova S.S., Pirogova E.M., Rozhdestvenskaya K.K. *Otchet o geologicheskoi s'emke masshtaba 1:50 000, provedennoi Podol'skoi geologo-gidrologicheskoi partiei na territorii listov N-37-15-Г; N-37-16-В; N-37-27-Б; N-37-28-А* [Research report on 1:50,000 scale geological survey carried out by the Podolsk expedition for the topographic sheets N-37-15-Г; N-37-16-В; N-37-27-Б; N-37-28-А], Moscow, Geological Survey of the Central Region, 1961, 2170 p. (In Russian)

Shik E.M., Vaskova S.S., Kontsova V.K. *Otchet o geologo-gidrogeologicheskoi s'emke masshtaba 1:50 000, provedennoi Mikhnevskoi partiej na territorii listov: N-37-16-G; N-37-28-B; N-37-28-G (Moskovskaya oblast) v 1962–1964 gg.* [Research report on 1:50,000 scale geological and hydrogeological survey carried out by the Mikhnevo expedition for the topographic sheets N-37-16-Г; N-37-28-Б; N-37-28-Г (Moscow region) in 1962–1964], Moscow, Geological Survey of the Central Region, 1964, 1286 p. (In Russian)

Shirinov N.Sh. Geomorfologicheskaya datirovka vozrasta Azykhskoi peshchernoi stoyanki paleoliticheskogo cheloveka [Geomorphologic dating of Paleolithic man site in the Azykh cave], *Proceedings of the Azerbaijan SSR Academy of Sciences. Earth Sciences series*, 1966, no. 5, p. 67–73. (In Russian)

Spötl C., Boch R. Uranium series dating of speleothems. *Encyclopedia of Caves*, W. White, D. Culver, T. Pipan (eds.), 2019, p. 1096–1102.

Web source

Informatsionno-poiskovaya sistema "Peshchery" [Search and information engine "Caves"], URL: https://speleoatlas.ru (access date: 12.11.2020).

Received 04.12.2020
Revised 20.02.2021
Accepted 18.03.2021