

Научная статья

УДК 551.435.88(470-25)

DOI 10.37724/RSU.2024.85.4.016

Морфоструктурный контроль подземного травертинонакопления в Москве¹

Владимир Алексеевич Неходцев¹, Андрей Александрович Лукашов²

¹ Научный институт Вайцмана, Реховот, Израиль

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

¹ nekhodtsev.v@gmail.com

² smoluk@yandex.ru

Аннотация. На внутренних стенках подземных коммуникаций Москвы местами активно формируются травертиноподобные наросты различной плотности — кальтемиты, аналогичные по формам спелеотемам карстовых пещер. В обнаруженных аномальных случаях кальтемиты локализируются с плотностью от 5–6 шт./м² до сплошного чехла мощностью порядка 30–40 см в виде зон длиной 50–200 м и больше. Размеры и обилие наростов заведомо превышают возможные объемы выщелачивания кальцита из обделки тоннелей на 2–3 порядка. Всего в Москве выявлено 58 зон аномального травертиногенеза (ЗАТ), которые расположены преимущественно в теле техногенно-погребенных долин и оврагов и суммарно составляют не более 1,5 % их протяженности. Границы зон достаточно четкие и не зависят от изменения формы сечения или материала обделки, уклона коллектора, рельефа местности, наличия каких-либо специфических производств на поверхности. Составлена карта выявленных аномалий. Исследованием охвачено порядка 1 000–1 200 км подземных сооружений всех типов, находящихся на глубине от 2–3 до 80–85 м и равномерно распределенных по территории Москвы. По литературным и фондовым материалам выполнено пространственное сопоставление зон аномального травертиногенеза с различными геоморфологическими и геологическими характеристиками.

В настоящей работе впервые для подобных явлений предлагается объяснение механизма и пространственных закономерностей аномального карбонатного литогенеза в подземных коммуникациях. Все известные нам обильные кальтемитообразования совпали с установленными другими авторами геодинамически активными зонами и линеаментами. Аномальный травертиногенез в подземных коммуникациях Москвы развивается в условиях дегазации CO₂ из подстилающих толщ на фоне деформаций приповерхностных мезокайнозойских рыхлых грунтов.

Ключевые слова: геодинамически активные зоны, кальтемиты, карст, подземные реки, субрельеф, суффозия, травертины.

Для цитирования: Неходцев В. А., Лукашов А. А. Морфоструктурный контроль подземного травертинонакопления в Москве // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2024. № 4 (85). С. 137–152. DOI: 10.37724/RSU.2024.85.4.016.

¹ Исследование выполнено на кафедре геоморфологии и палеогеографии МГУ имени М. В. Ломоносова в рамках темы госзадания № 121040100323-5 «Эволюция природной среды в кайнозое, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования».

Original article

Morphostructural control of underground travertine formation in Moscow

Vladimir A. Nekhodtsev¹, Andrey A. Lukashov²

¹ Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

¹ nekhodtsev.v@gmail.com

² smoluk@yandex.ru

Abstract. Calthemites (secondary travertine deposits and forms similar to speleothems of karst caves) are usually formed on the inner walls of man-made underground structures in Moscow and other cities. In general, this is a normal process of concrete leaching, but we have found a number of abnormal cases. In such places density of calthemites vary from 5–6 per m² to 30–40 cm of flowstone rind in 50–200 m long zones. We called these cases as anomalies of calthemites formation. The distribution and volume of these underground formations exceed possible leaching from concrete construction by 100–1 000 times. We spotted 58 zones of calthemites formation in Moscow city. These zones are located mostly in storm sewer within man-made buried valleys and ravines and occupy less than 1,5 % of its length. Anomalies of calthemites formation have sharp borders, which don't depend on shape, inclination and construction material (bricks or concrete), relief and specific types of industrial waste from the surface. The article contains the map of revealed abnormal zones. Current investigation covers 1 000–1 200 km of underground constructions of all types with depth from 2–3 to 80–85 m evenly distributed throughout Moscow.

We matched all anomalies of calthemites formation with various geologic and geomorphologic characteristics. This article for the first time suggests explanation of mechanisms and spatial distribution of travertine formation within underground structures. All known abnormal cases of calthemites formation match with neotectonic geodynamically active zones and lineaments revealed by other authors. Abnormal travertine formation in Moscow underground infrastructure develops in conditions of CO₂ degassing from deeper Jurassic clay and sand. This process takes against the backdrop of the deformation of near-surface Mesozoic and Cenozoic loose ground.

Keywords: geodynamically active zones, calthemites, karst, underground rivers, sub-relief, suffusion, travertines.

For citation: Nekhodtsev V. A., Lukashov A. A. Morphostructural control of underground travertine formation in Moscow. *The Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin*, 2024; 4 (85):137–152. (In Russ.). DOI: 10.37724/RSU.2024.85.4.016.

Введение

В подземных сооружениях многих городов (например, в Москве, Манчестере, Лодзи и др.) наблюдаются своеобразные проявления аккумулятивного карстового процесса. На внутренних стенках коммуникаций местами формируются оглиненные травертиноподобные наросты различной плотности и крепости, сходные со спелеотемами — натечными образованиями пещер. Такие карбонатные образования в зарубежной литературе называют кальтемитами (англ. calthemites). В нормальных условиях в подземных сооружениях наблюдается образование подтеков (так называемых высолов) и кальтемитов в объемах (миллиметры и первые сантиметры), соответствующих процессам выщелачивания калцита из бетона и цемента отделки (см.: [Macleod, Hall, Fallick, 1990 ; Hill, Forti, 1997]).

Интерес же представляет выявленный сверхактивный карбонатный литогенез: кальтемиты причудливых форм в обилии локализуются в тоннелях на отрезках протяженностью 50–200 м с резкими границами. Размеры и обилие кальтемитов заведомо превышают возможные объемы выщелачивания отделки на 2–3 порядка, а сами они не уступают в морфологической причудливости спелеотемам карстовых пещер. В настоящей работе мы впервые для подобных явлений предлагаем объяснение пространственных закономерностей аномального карбонатного литогенеза в подземных коммуникациях Москвы.

Актуальность исследования определена скупостью представлений о причинах и факторах неблагоприятного явления — формирования натечных карбонатных образований. Подобные геохимические процессы активно повреждают и разрушают отделку сооружений в ходе выщелачи-

вания карбоната и роста давления внутриверховой кристаллизации новых минеральных образований и гидратации (см.: [Алексеев, Иванов, Модры, Шисль, 1990 ; Дашко, Александрова, Котюков, Шидловская, 2011]). Причины и пространственная приуроченность аномально активного карбонатного литогенеза внутри подземных сооружений прежде не изучались.

Основная часть

Характеристика объекта исследования

1. Зоны аномального травертиногенеза

Мы уже публиковали подробную характеристику карбонатных новообразований в подземных коммуникациях Москвы и схему размещения зон аномального травертиногенеза (ЗАТ) (см.: [Геоморфология ... , 2017, с. 103–120 ; Неходцев, 2019]). Тезисно резюмируем фактический материал. В обнаруженных аномальных случаях крупные кальтемиты локализуются на внутренних стенках сооружений с плотностью от 5–6 шт./м² до сплошного чехла мощностью 30–40 см и более.

Среди натечных образований ЗАТ преобладают боковые и потолочные натёки различных форм (рис. 1), зачастую сливающиеся в единую «сталактит-сталагмитовую кору», что связано с одновременной восходящей и горизонтальной фильтрацией грунтовых вод, а также с формой и размерами подземных коммуникаций. В англоязычной литературе такие формы субрельефа (см.: [Болысов, Неходцев, 2020]) называют флоустонами (flowstone) — покровными водными хемогенными отложениями, образованными пленочными и текучими водами на стенах и «полотне» подземных полостей. Такие формы образованы стекающими под действием силы тяжести водными струями и каплями. Для их пористых аналогов был предложен термин «туфовая сталактит-сталагмитовая кора» (см.: [Степанов, 1971]), что подчеркивает и их строение, и значительные скорости формирования. Некоторые из травертиновых образований сопоставимы по объемам с человеком (см. рис. 1 в, г).

На потолках коллекторов прямоугольного сечения чаще встречаются конические сталактиты; одноканальные сталактиты (типа пещерных «спагетти») редки. Значительную часть подземных сталактитов, ввиду их внутренней аструктурности, уместнее называть туфлакитами — быстро растущими в условиях высокого пересыщения натёками, которые состоят из известкового туфа и потому лишены внутренней структуры (см.: [Степанов, 1998]). Действительно, по нашим наблюдениям, кальтемиты в подземных коммуникациях хотя и твердые, но часто пористые, с большим количеством каналов (рис. 2). Аналогичные туфлакиты изредка присутствуют на испарительных барьерах, например в припортальных частях карстовых пещер аридных регионов (рис. 3 а, б), в глубине которых сталактиты обладают обычной концентрической структурой и кристаллической фактурой.

Состав кальтемитов, материал которых поступает из дифференцированных естественных и техногенных грунтов, весьма непостоянен: от преимущественно кальцитового до существенно глинистого (нерастворимый остаток > 50–60 %) и ожеженного (см.: [Неходцев, 2019 ; Селивачова, 2010]). Встречающиеся кальтемиты бывают как достаточно прочными, так и хрупкими.

По результатам исследований на территории Москвы нами выявлено немногим менее 60 зон аномального карбонатного литогенеза. Им присвоены порядковые номера, указанные и в тексте, и на рисунке 4. Почти все они локализованы в коллекторах подземных рек (ливнесточах), проложенных в толще техногенно-погребенных долин и малых эрозионных форм (см.: [Неходцев, 2021]).

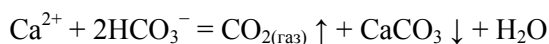
Контурные аномального травертиногенеза не совпадают с границами разновозрастных участков коллектора, не связаны с изменением формы сечения или материала отделки. Просачивание грунтовых вод внутрь коллекторов — явление заурядное, хотя конструкционно и не предусмотренное. Активное травертинонакопление сопутствует поступлению подземных вод в коллекторы весьма редко: ему подвержено не более 1,5 % обследованной подземной гидросети (в прочих подземных сооружениях отмечены лишь единичные случаи). Никак не проявляют себя смена уклона коллекторов, рельеф, характер освоения городского пространства (улицы, парки, заводы и др.), наличие каких-либо специфических производств на поверхности. Сегодняя активность ЗАТ не связана с возрастом вмещающих подземных сооружений (для

Москвы — с 1870-х годов). Вместе с тем в момент обследования многие ЗАТ оказывались сухими, что может быть связано как с сезонностью колебаний уровня подземных вод (см.: [Геоморфология ... , 2017, с. 80–93]), так и с закупоркой подводящих каналов.

Описанное явление распространено во многих городах с развитой технопогребенной гидросетью (например, английские Лондон и Манчестер, канадские Эдмонтон, Торонто и Монреаль, польский Лодзь, Киев, Волгоград и др.), в дренажно-штольневых системах, осушающих оползневые склоны (например, в Киеве), реже — в иных тоннелях и шахтных выработках (Садонский рудник по добыче полиметаллов в Северной Осетии, бывший гидротоннель Годарвилль на канале Шарлеруа — Брюссель в Бельгии). Примечательно, что в геологическом разрезе многих перечисленных мест, в отличие от Москвы, отсутствуют толщи карбонатных пород.

2. Механизм образования кальтемитов в ЗАТ

Не вызывает сомнения сам механизм образования кальтемитов в подземных реках города. После засыпки долин происходит относительная стагнация грунтовых вод и насыщение ими тела технопогребенной долины (см.: [Неходцев, 2021]), что сопровождается выщелачиванием карбонатов из грунта подземными водами с повышенным парциальным давлением CO_2 (иногда при гидростатической связи с другими водоносными горизонтами). Такая насыщенная растворенными карбонатами вода (как правило, под давлением немногим выше атмосферного) проникает через обделку в коллектор. На границе обделки — на испарительном барьере — происходит дегазация растворенного CO_2 , что приводит к пересыщению раствора и осаждению CaCO_3 на внутренних стенках коллекторов:



Экспериментально подтверждено (см.: [Gradziński, 2010]), что интенсивность накопления туфа зависит от индекса насыщения Ланжелле исходного раствора. Осаждающийся из грунтовых вод карбонат кальция попутно цементирует и привносимые глинистые частицы. Механизм формирования травертина (и подобных ему образований) в связи со сдвигом карбонатного равновесия при поступлении раствора в подземную полость или на дневную поверхность подробно описан во множестве работ (см., напр.: [Heimann, Sass, 1989 ; Chen, Zhang, Wang [et al.], 2004 ; Pentecost, 2005]). Дегазация CO_2 бывает обусловлена различными эффектами: резким падением его парциального давления, испарением, турбулентностью раствора, повышением температуры в месте разгрузки и др.

Устоялось также представление о заметной роли живых организмов (от прокариот и простейших водорослей до мхов и даже цветковых растений) в осаждении карбонатов разного типа (см.: [Никитин, 2015 ; Pentecost, 2005 ; Gradziński, 2010 ; Sanders, Wertl, Rott, 2011]). Существенную роль играют, в частности, пресноводные реофильные литофильные водоросли — *Algae*, подсемейство *Corallinideae* (см.: [Лукашов, 2004]). Вместе с тем аномальный травертиногенез в подземных реках не приходится связывать с локальной пораженностью специфической биотой: для таких коллекторов характерно регулярное заполнение ливневыми паводками, вплоть до напорного течения (см.: [Болысов, Неходцев, 2016 ; Геоморфология ... , 2017, с. 103–120]), что привело бы к куда более широкому развитию травертиногенеза. Специальный биологический анализ по этой причине нами не проводился.

Для морфолитологически аналогичных кальтемитов в дренажно-штольневых системах Киева по анализу соотношения изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ было установлено, что источником карбонатов являются породы, вмещающие подземное сооружение (см.: [Селівачова, 2010]). В пределах ЗАТ в Москве не отмечена гидрогеологическая связь с горизонтами подземных вод в толще нижележащих каменноугольных карбонатных пород (см.: [Геологический атлас Москвы, 2010]); почти повсеместно превалирует нисходящая фильтрация надморенного и надъярского комплексов подземных вод (см.: [Москва ... , 1997]). Хотя для Москвы аналогичный изотопный анализ не был проведен, отметим, что ЗАТ концентрируются на глубинах от 1 до 5–6 м, а глубже 12–15 м почти не встречаются (кроме ЗАТ № 15, 33, 38, 49, 55).

Для наглядного представления аномальности объемов травертиногенеза совместно с А. В. Зотовой подготовлена иллюстрация поперечного сечения 3,5-метрового коллектора реки Пресня под Новопресненским переулком в Москве с сохранением всех пропорций (рис. 5).

Обратим внимание на то, что объем травертиновых кальтемитов не только на первые порядки превышает объемы цементирующего кирпича затвердевшего раствора, но и объем самих кирпичей, которые (вместе с раствором) визуально никак не пострадали за 115 лет. На иллюстрации видно, что наросты не достигают воды и их совсем нет под водой. Сильно загрязненные химическими веществами воды подземных рек (см.: [Болысов, Неходцев, 2016]) агрессивны к карбонатам и растворяют их быстрее, чем те формируются; также кальтемиты механически разрушаются во время ливневых паводков.

Отсутствие связей зон аномального травертиногенеза с конструкционными особенностями коллекторов, характером освоения городских территорий и локальной пораженностью специфической биотой делает очевидной их обусловленность некими геологическими условиями.

Материалы и методы

1. Изученность вопроса

Несмотря на то, что механизм образования травертиноподобных карбонатов достаточно изучен, до сих пор остра дискуссия по терминологии и классификации пресноводных карбонатов (см.: [Никитин, 2015 ; Pentecost, 2005, pp. 2–18 ; Sanders, Wertl, Rott, 2011]). Подробный разбор этой дискуссии оставим за рамками настоящей работы. Для обозначения кальтемитов в киевских подземельях в работе У. М. Селивачевой (см.: [Селивачова, 2010]) используется понятие «карбонатные новообразования» — верное по сути, но скупое по содержанию. Мы же, вслед за рядом авторов, предпочитаем термин «травертин» (известковый туф), подразумевая легкий хемогенный известняк с пористостью более 10–15 % (см.: [Heimann, Sass, 1989]), осажженный в континентальных условиях (см.: [Pentecost, 2005]) в результате дегазации CO₂ при разгрузке подземных вод, независимо от его минералогии, морфологии и температурного режима (см.: [Sanders, Wertl, Rott, 2011]).

Травертиновые накопления в подземных коммуникациях относятся к низкотемпературным пресноводным карбонатам кальцит-доломитового ряда — температурный режим источников близок к среднегодовым температурам области питания и не превышает 20 °C (см.: [Sanders, Wertl, Rott, 2011]). В отечественной литературе они также называются известковыми туфами холодных источников (см.: [Максимович, 1963]).

Появляются работы, авторы которых стремятся установить причины и факторы формирования некоторых типов пресноводных карбонатов. Отмечается связь слоистой структуры травертиновых образований с периодичностью их формирования (механизмы различны). Так, общеизвестна сезонность образования травертиновых спелеотем в пещерах, что используется при датировании методами склерохронологии. Кальтемиты, формирующие зону аномального травертиногенеза, аналогичную московским, исследовались в заброшенном кирпичном гидротоннеле Годарвилль (Бельгия). По соотношению химических сигналов Sr/Ca было предположено, что существует четкая обратная корреляция между скоростью карбонатного литогенеза и температурой воздуха на поверхности (см.: [Kuczumow, Genty, Chevallier [et al.], 2005]).

Все больше появляется сведений о связи травертиногенеза (как низкотемпературного, так и гидротермального) с периодической тектонической, флюидо- и газогенерирующей активностью разломных зон в различных регионах: полуостров Малая Азия (см.: [Brogi, Capezzuoli, Alçiçek, Gandin, 2014]), Центральная Италия (см.: [Brogi, Capezzuoli, 2014]), Ижорское плато и Ленинградская область (см.: [Никитин, 2015]), Израиль (см.: [Heimann, Sass, 1989]).

Любопытный вывод дало исследование кальтемитов в теле бетонной плотины на реке Уцзян (приток Янцзы): показано падение содержания CO₂ с 350 до 150 ppmv в помещениях с наиболее активным карбонатным литогенезом (см.: [Liu, He, 1998]). Подобный анализ, увы, невозможно провести в коллекторах подземных рек, поскольку в них круглогодично и почти повсеместно присутствует значительная воздушная тяга (против течения), сопровождаемая активным воздухообменом с поверхностью через ливневые решетки (см.: [Геоморфология ... , 2017, с. 103–120]).

Геологическое строение Москвы всесторонне изучено. В настоящей статье проанализированы геологические отчеты из Российского федерального геологического фонда (см.: [Федонкина, Барс, Макарова [и др.], 1982 ; Кочев, Зайянец, Мамонтов, 1991]), тематические гидрогеологические материалы монографии «Москва. Геология и город» (см.: [Москва ... , 1997]). За основу факти-

ческого материала по геологическому и гидрогеологическому строению взят Геологический атлас Москвы в масштабе 1 : 10 000, подготовленный в Московском городском тресте геолого-геодезических и картографических работ (см.: [Геологический атлас Москвы, 2010]). В атласе приведены карты четвертичных, дочетвертичных (мезозойские, палеозойские) отложений, гидрогеологические разрезы, карты опасных процессов, техногенных отложений и т. д. Для составленных по территории Москвы карт линеаментов и разломных зон их расположение подтверждено инструментально методами геофизики (см.: [Федонкина, Барс, Макарова [и др.], 1982 ; Воейкова, Макаров, Несмеянов, 2007 ; Григорьева, Макаров, 2010]).

2. Выполненная аналитика

С 2007 по 2022 год нами непосредственно обследовано более 300 подземных сооружений Москвы общей протяженностью более 600 км. Проводился опрос представителей неформальных субкультур (так называемых «диггеров», или подземщиков), использовались описания и фотографии встреченных ими крупных кальтемитов. Соответствующая информация по обследованию строящихся и действующих тоннелей московского метрополитена (30–40 % от их протяженности) предоставлена историком, фотографом газеты «Метростроевец» А. В. Поповым. Таким образом, наше исследование покрывает порядка 1 000–1 200 км подземных сооружений всех типов, находящихся на глубине от 2–3 до 80–85 м и равномерно распределенных по территории Москвы.

По литературным и фондовым материалам выполнено пространственное сопоставление выявленных зон аномального травертиногенеза в Москве с различными геоморфологическими и геологическими характеристиками. Результаты представлены в таблице и примечаниях к ней.

Таблица

Анализ пространственной приуроченности зон аномального травертиногенеза в подземных коммуникациях Москвы

Анализируемая характеристика	Литературный источник	Выявленная зависимость
Геоморфологическое положение ¹	[Москва ... , 1997, с. 14 ; Геологический атлас Москвы, 2010]	Отсутствует
Доюрский рельеф ²	[Геологический атлас Москвы, 2010]	54/57 ЗАТ находятся в пределах междуречий
Вмещающие отложения ³	[Геологический атлас Москвы, 2010]	Отсутствует
Литология вмещающих отложений ³	[Геологический атлас Москвы, 2010]	Отсутствует
Подстилаемые отложения ³	[Геологический атлас Москвы, 2010]	Отсутствует
Литология подстилаемых отложения ³	[Геологический атлас Москвы, 2010]	Отсутствует
Старые городские свалки	[Геологический атлас Москвы, 2010]	Отсутствует
Глубина и состав кровли каменно-угольных отложений ³	[Геологический атлас Москвы, 2010]	Отсутствует
Питающий горизонт подземных вод ⁴	[Геологический атлас Москвы, 2010]	1/3 — надморенный; 2/3 — надьюрский
Техногенные стабильные источники вибраций (железные дороги, автомагистрали, линии метро)	Полевые наблюдения; [Неходцев, 2019]	Отсутствует
Структурный план кристаллического фундамента платформы	[Федонкина, Барс, Макарова [и др.], 1982 ; Москва ... , 1997, с. 45]	Отсутствует
Схематическая структурная карта по кровле глин C ₂ vг	[Москва ... , 1997, с. 61]	Отсутствует
Схематическая структурная карта по кровле глин J ₃ –J ₂	[Москва ... , 1997, с. 68]	К флексурам и структурным уступам 2–4 порядков приурочены ЗАТ № 15, 17, 33, 35, 37, 42, 43, 46, 48–52, 54–57
Карта агрессивности грунтовых вод	[Москва ... , 1997, с. 151]	Отсутствует

Окончание таблицы

Анализируемая характеристика	Литературный источник	Выявленная зависимость
Водопроницаемость каменноугольных водоносных горизонтов	[Федонкина, Барс, Макарова [и др.], 1982, прил. 3, л. 1]	Отсутствует
Интенсивность питания первого от поверхности водоносного горизонта. Суммарный водоотбор	[Москва ... , 1997, с. 155, 239]	Отсутствует
Карта аномалий плотности потока радона (ППР) с поверхности	[Микляев, Макаров, Дорожко [и др.], 2013, с. 181]	55/57 ЗАТ приурочены к геодинамически активным зонам и линейным; из них 19 — к зонам сгущения аномалий ППР
Радонодышающие линейные элементы Москвы	[Микляев, 2015, с. 215]	17/57 ЗАТ совпадают с Rn-линейными элементами
Карта фонового поля ППР	[Микляев, Макаров, Дорожко [и др.], 2013, с. 176]	Отсутствует
Неотектоническая карта Москвы	[Федонкина, Барс, Макарова [и др.], 1982, прил. 2]	48/57 ЗАТ расположены у границ неотектонических структур и (или) областей сгущения линейных элементов
Структурно-геоморфологическая схема 3 участков Москвы в крупном масштабе ⁵	[Григорьева, Макаров, 2010, с. 107, 109, 110]	Высокая ⁵
Техногенное загрязнение почв	[Москва ... , 1997, с. 319–320]	Отсутствует
Эмиссия и поглощение парниковых газов (CO ₂ , CH ₄) в почвах Москвы	[Можарова, Кулачкова, Лебедь-Шарлевич, 2018]	Отсутствует

Примечания:

1. ЗАТ расположены в различных геоморфологических позициях от пойм до междуречий (в том числе проанализирован погребенный неогеновый рельеф).

2. Все ЗАТ (кроме трех не самых активных) расположены в пределах междуречий доюрского рельефа, не встречаются над переуглубленными палеодолинами Москвы-реки и Яузы и резко обрываются прямо над бровками, если таковые попадают на них (ЗАТ № 22, 24, 28, 46).

3. Коллекторы с ЗАТ построены практически во всех генетических и литологических типах отложений, представленных в геологическом разрезе Москвы: морены, глины, суглинки и пески от юрских до голоценовых, подстилаются днепровской и московской моренами, морскими глинами и песками юрского и мелового возраста. Кровля каменноугольных карбонатных пород находится на глубинах от 11 до 99 м под коллекторами с ЗАТ и представлена пятью свитами трех ярусов среднего и позднего карбона (глины, известняки, мергели).

4. В качестве питающих закономерно, в соответствии с геологическим строением, выступают надморенный (1/3 случаев) и надюрский (2/3 случаев) горизонты подземных вод; в 40 % случаев они совмещены друг с другом; в единичных случаях отмечено совмещение с каменноугольными водами и верховодкой. 10 из 57 ЗАТ сформированы в условиях разгрузки напорных подземных вод. Не выявлено связи с эрозийными окнами в региональном водоупоре — юрских глинах оксфордского возраста.

5. Установлена связь 48 из 57 ЗАТ с неотектоническим структурным планом территории (см.: [Федонкина, Барс, Макарова [и др.], 1982, прил. 2]). Не совпадают с неотектоническими линейными структурами лишь 2 из наиболее выраженных ЗАТ (№ 12 и 24) и 7 из «рядовых». Однако 5 из них приурочены флексурам и структурным уступам 2–4 порядков, выявленным по кровле глин J₃–J₂ (см.: [Москва ... , 1997, с. 68]). С геодинамически активными зонами и (или) областями сгущения линейных элементов соотносятся 13 из 14 ЗАТ, попавших на крупномасштабные структурно-геоморфологические схемы отдельных районов Москвы (см.: [Григорьева и Макаров, 2010]).

Таким образом, можно утверждать, что выявлена хорошая корреляция аномального травертиногенеза в подземных коммуникациях Москвы с неотектоническим структурным планом территории. Практически все ЗАТ расположены в пределах геодинамически активных зон, выявленных прежде рядом исследований.

Морфоструктурный контроль подземного травертиногенеза в Москве

Очевидно, что для активного травертиногенеза необходимо четыре компонента: 1) источник карбонатов; 2) избыток воды; 3) обилие углекислого газа в грунтах; 4) возможно, специфическая микробиота в подземных коммуникациях. В техногенных, а в некоторых случаях и естественных грунтах Москвы (днепровская морена), нет недостатка в карбонатах. Сказанное тем более справедливо для крупного города, где многое построено из железобетона: цементная основа делается из известняков и доломитов. Известно, что после перевода рек в коллекторы повышается уровень грунтовых вод, растет их минерализация, развивается верховодка, интенсифицируется подтопление, в теле засыпанных долин формируется медленный линейный грунтовый сток (см.: [Неходцев, 2021]). Ливнесточные коллекторы наполняются с поверхности осадками, изобилующими различной флорой и фауной (см.: [Геоморфология ... , 2017, с. 103–120]).

Исходя из сказанного, зоны аномального травертиногенеза могут контролироваться только повышенным содержанием растворенного CO_2 . К его основным потенциальным источникам относятся: а) газогенерация вмещающих подземные сооружения грунтов; б) газогенерация нижележащих толщ; в) эндогенная газовая эманация. Для первого случая связь не выявлена, хотя газогенерация CO_2 московскими техногенными грунтами — явление с широким площадным распространением (см.: [Можарова, Кулачкова, Лебедь-Шарлевич, 2018]), тогда как аномальный травертиногенез весьма локален. Во втором и третьем случаях требуются особые условия для восходящей миграции углекислого газа — зоны трещиноватости с повышенной газо- и (или) водопроницаемостью. Известно, что конвективная миграция газов в грунтах на 2–3 порядка превосходит его диффузный перенос.

Анализ показал, что практически все выявленные ЗАТ ассоциированы и со структурными границами, и с линеаментами диагональной ориентировки. Это потенциально указывает на их связь с регматической сетью линеаментов, отражающей характер общепланетарной трещиноватости, связанной со сдвиговыми ротационными напряжениями в земной коре. Аналогичное установлено инструментальными исследованиями дегазации верхних толщ осадочного чехла платформ, в том числе радона (см.: [Микляев, 2015]).

Вместе с тем пространственная приуроченность почти половины ЗАТ к структурообразующим элементам 2–4 порядков (сорванным крыльям флексур и уступам), выявленным по кровле глин J_3 – J_2 , свидетельствует о наложении ротационного фактора на эндогенное структурно-геодинамическое силовое поле. Связь ЗАТ с наиболее древними из дочетвертичных структур может реализовываться в пределах диаклазовых швов, особенности строения которых изложены в работе О. А. Воейковой, В. И. Макарова и С. А. Несмеянова (см.: [Воейкова, Макаров, Несмеянов, 2007]).

При этом отсутствие связи с доюрскими и неогеновыми врезами указывает на приуроченность ЗАТ к современным «платформенным разломам» (см.: [Kuzmin, 2009]). Отмеченное подтверждается высокой корреляцией ЗАТ с неотектоническим структурным планом и соотносится с разрабатываемыми сотрудниками РАН положениями современной геодинамики (см.: [Кузьмин, 2014 ; Kuzmin, 2009]) и представлениями о геодинамически активных зонах (см.: [Юдахин, Щукин, Макаров, 2003 ; Макаров, Дорожко, Макарова, Макеев, 2007]). Данные взгляды противопоставляются прежним, менее обоснованным представлениям о блоковой кинематике разломных структур платформ как ограниченных тектоническими блоками узких «трещин». Те же представления фиксируют и объясняют несостоятельность привычной парадигмы унаследованного характера развития современных геодинамических процессов на платформах. Даже крупные разломы фундамента инструментально не диагностируются уже в приподошвенных частях осадочного чехла, а в его верхней части выражены самое большее в виде плавных изгибных деформаций и флексур конседиментационного типа. Выделяющиеся на платформах геодинамически активные зоны (ГДАЗ) — преимущественно линейно вытянутые объемы земной коры разного масштаба, в которых в силу различных причин существуют условия для концентрации и разрядки тектонических напряжений, повышенных градиентов движений и деформированности горных пород (см.: [Макаров, Дорожко, Макарова, Макеев, 2007]). Ширина наименее крупных таких зон может составлять от 30–110 м (см.: [Воейкова, Макаров, Несмеянов, 2007]) до 1 км (см.: [Кузьмин, 2014]); маркируются они обычно структурными уступами, крыльями поднятий, а также впадинами, речными долинами и оврагами, заложенными по зонам сгущения трещиноватости в рыхлых отложениях. В некоторых случаях ГДАЗ развиваются в условиях сопряжения неоднородных геолого-геофизических сред (см.: [Макаров, Дорожко, Макарова, Макеев, 2007]).

В пределах ГдАЗ платформ инструментально подтверждены так называемые суперинтенсивные деформации земной поверхности — аномальные высокоамплитудные (50–70 мм/год) короткопериодические (0,1–1,0 года) движения грунта с пульсационной и знакопеременной направленностью (см.: [Кузьмин, 2014]). Такие движения затрагивают лишь верхние десятки метров грунтов и не наследуют разломные структуры прошлых эпох (см.: [Макаров Дорожко, Макарова, Макеев, 2007 ; Кузьмин, 2014 ; Микляев, 2015]). Проблема диагностирования суперинтенсивных деформаций посвящена работа (см.: [Кузьмин, 2014]).

Локальная дегазация CO_2 , контролирующая активный травертиногенез в подземных коммуникациях, на наш взгляд, связана с узкими пикообразными зонами суперинтенсивных движений, или деформационными аномалиями γ -типа (см.: [Кузьмин, 2014]). В статичных условиях внутри платформенного чехла преобладают горизонтальные диффузные миграции газов и подземных вод, тогда как в пределах ГдАЗ реализуется восходящая конвекция CO_2 , которая, очевидно, интенсифицируется при деформациях грунта (рис. 6).

Основным источником CO_2 в таком случае служат нижележащие, богатые органикой газогенерирующие глинистые юрские отложения, которые неизменно подстилают все (кроме одной) ЗАТ. Такая гипотеза хорошо объясняет высокую корреляцию с факельными аномалиями эсгалии радона, которые связаны с деформациями в пределах геодинамически активных зон (см.: [Микляев, 2015]). Как известно, ^{222}Rn является «детерминированным» индикатором многих геодинамических процессов.

В работе Ю. О. Кузьмина (см.: [Kuzmin, 2019]) было показано, что описанные локальные суперинтенсивные смещения грунта суть неадекватно большие индуцированные деформационные отклики на малые воздействия. Это могут быть отдаленные землетрясения, в частности мантийные землетрясения в горах Вранча (Румыния) 10 ноября 1940 года и 04 марта 1977 года, колебания земной коры в ходе которых доходили до Москвы (один из авторов статьи был очевидцем московского отклика сейсмического события 04 марта 1977 года). Наряду с сейсмическими «сигналами» деформационные отклики вызываются насыщением грунтов водой, неравномерным прогреванием земной поверхности, что актуально для технопогребенных долин (см.: [Неходцев, 2021]), и др. Деформации γ -типа реализуются посредством параметрического возбуждения регионального и глобального напряженно-деформированного состояния относительно слабыми воздействиями на «тело» геодинамически активных зон. Например, среди прочего Ю. О. Кузьмин показывает, что флуктуации эффективного порового давления в трещиноватой флюидонасыщенной среде разломной зоны приводят к изменению степени трещиноватости (меняются жесткостные характеристики), что интенсифицирует деформации в данной зоне (см.: [Kuzmin, 2019]).

Локальные деформации, вызванные даже слабыми сейсмическими событиями, способствуют усилению восходящей миграции подземных вод и конвекции CO_2 (см.: [Muir-Wood, King, 1993]), вызывают интенсификацию травертиногенеза в пределах разломных зон (см.: [Brogi, Capezzuoli, 2014 ; Brogi, Capezzuoli, Alçiçek, Gandin, 2014]). Аналогичны механизмы и причины аномальной факельной эсгалии радона в Москве вследствие изменения напряженно-деформируемого состояния приповерхностных грунтов (см.: [Микляев, 2015, с. 53]). Частичное несовпадение зон аномального травертиногенеза с факельными аномалиями плотности потока радона (ППР) можно объяснить тем, что ППР замерялась кратковременно, когда часть геодинамически активных зон не «дышала». Сам же П. С. Микляев пишет, что «выделяются периоды частого проявления аномалий, сменяющиеся промежутками времени, в которых аномалий не встречается вовсе, причем максимумы частоты проявления аномалий ППР повторяются с периодом примерно 14–16 месяцев» (см.: [Там же, с. 218]). Карбонатный же литогенез в подземных коммуникациях — процесс несравненно более длительный и фиксирует даже длиннопериодическое «дыхание» ГдАЗ; выше мы указывали, что не все зоны аномального травертиногенеза были активны при их обследовании.

Косвенно предложенную нами гипотезу подтвердил анализ кальтемитообразования в тоннелях московского метрополитена (на рис. 4 отмечены немасштабными знаками): все известные нам максимально обильные образования совпали с установленными геодинамически активными зонами (см.: [Григорьева, Макаров, 2010]) и линеаментами (см.: [Федонкина, Барс, Макарова [и др.], 1982]), при этом за пределами техногенно-погребенных долин. Заметим, однако, что аномальный травертиногенез в метро — явление редкое, что может быть связано как с большей глубиной заложения, так и с повышенными требованиями к гидроизоляции обделки.

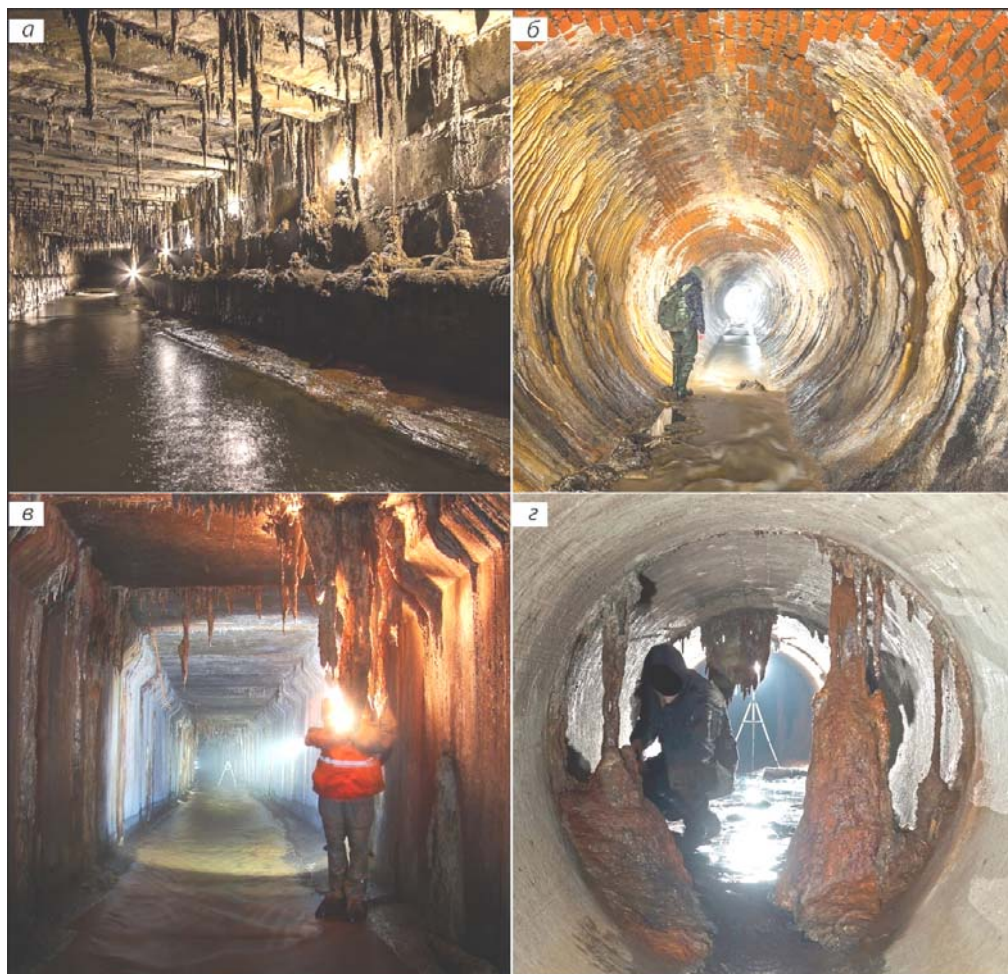


Рис. 1. Зоны аномального травертиногенеза в подземных реках Москвы: а — Таракановка, ЗАТ № 22 (фото А. И. Антохина); б — Пресня, ЗАТ № 24 (фото В. А. Неходцева); в — Копытовка, ЗАТ № 12 (фото С. А. Корнева); г — Владыкинский ручей, ЗАТ № 7 (фото В. А. Неходцева)

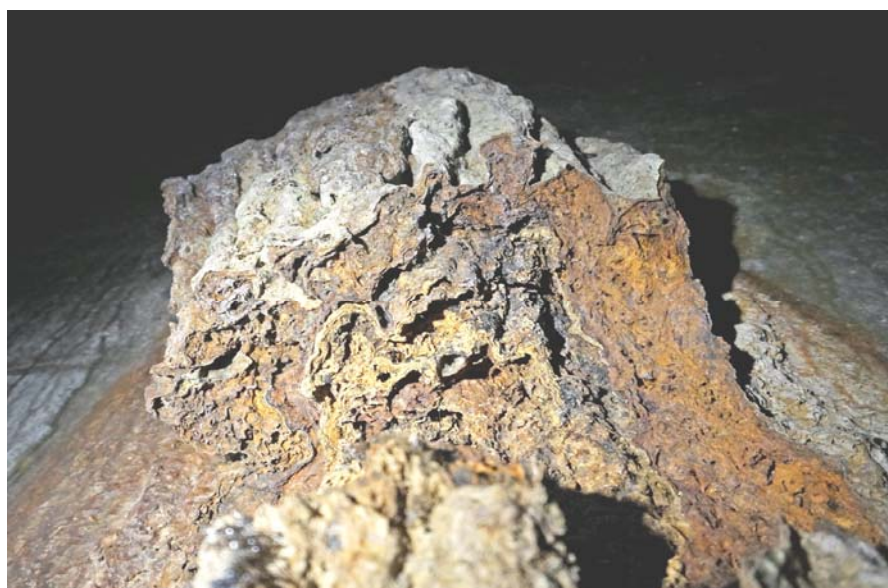


Рис. 2. Срез типичного крупного ($D = 25$ см) кальтемита на боковой стенке коллектора (фото Г. А. Белика)

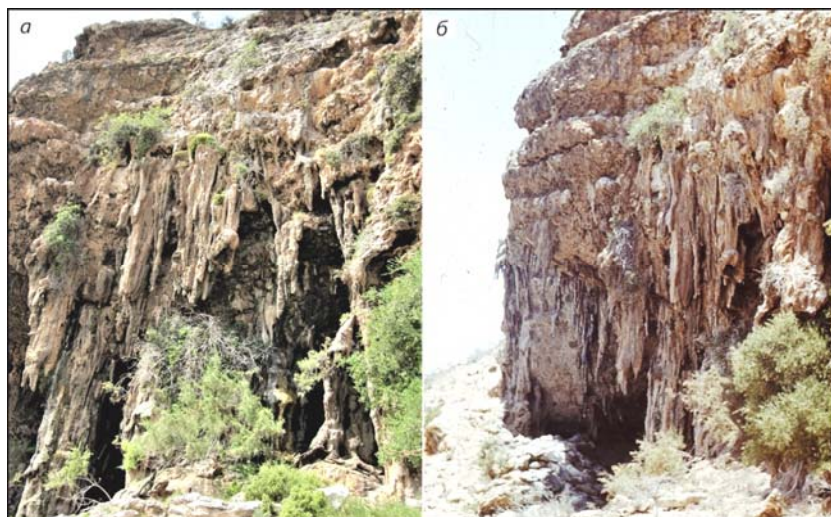


Рис. 3. Пористые туфлакиты на испарительном барьере в припортальных частях карстовых пещер на тропическом острове Сокотра (Йемен) (фото А. А. Лукашова)



Рис. 4. Схема размещения выявленных зон аномального травертиногенеза в Москве (см.: [Неходцев, 2019], с доп.)

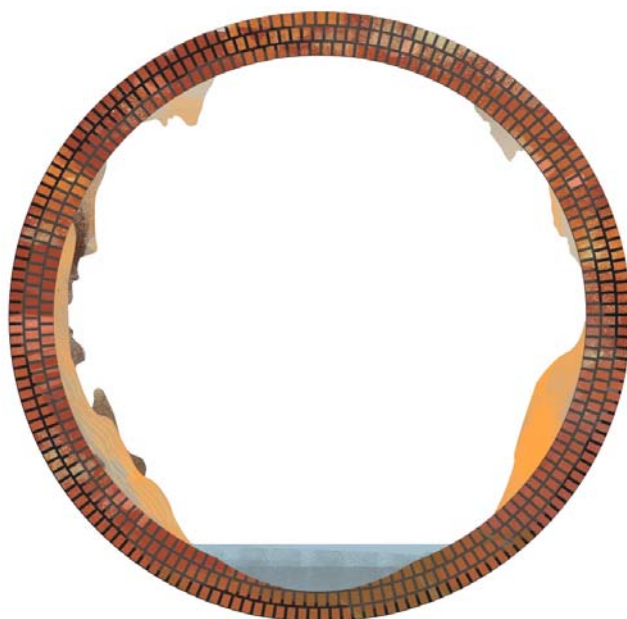


Рис. 5. Поперечный срез пораженного множественными кальтемитами коллектора ($D = 3,5$ м) убранной под землю в 1912 году реки Пресня (ЗАТ № 24); все пропорции соответствуют реальным (иллюстрация А. В. Зотовой)

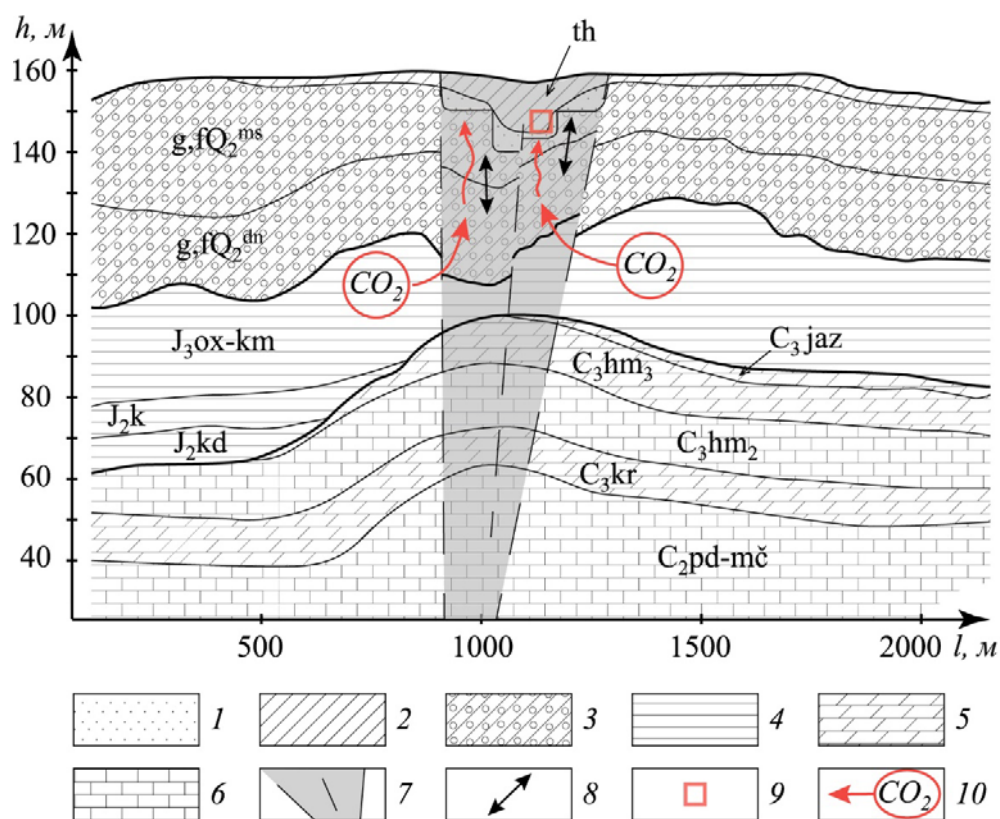


Рис. 6. Принципиальная схема формирования зон аномального травертиногенеза в подземных коммуникациях Москвы в условиях изгибных деформаций платформенного чехла:
1 — нерасчлененные аллювиальные отложения; 2 — насыпные грунты; 3 — нерасчлененная толща ледниковых (морена) и водноледниковых (пески, суглинки) отложений; 4 — глины; 5 — мергели; 6 — известняки; 7 — геодинамически активная зона; 8 — деформации приповерхностных грунтов; 9 — коллектор подземной реки; 10 — пути миграции CO_2

Заключение

Можно утверждать, что выявлена удовлетворительная корреляция аномального травертиногенеза (образование так называемых кальтемитов — аналогов пещерных спелеотем) в подземных коммуникациях Москвы с неотектоническим структурным планом территории. Установленное хорошо соотносится с актуальными представлениями о формировании травертиновых и иных генетических типов в разных регионах мира. Аномальный травертиногенез в подземных коммуникациях Москвы подчинен локальной усиленной дегазации CO_2 из газогенерирующих юрских глин и песков в пределах геодинамически активных зон. Причиной конвективного подъема углекислого газа, видимо, являются суперинтенсивные и «ротационные» деформации рыхлых грунтов (юрских, меловых и четвертичных песков, глин и суглинков) верхней части разреза. Такие деформации в целом не связаны со «штамповой» тектоникой, а являются результатом параметрического возбуждения напряженно-деформируемого состояния приповерхностных грунтов (преимущественно на глубинах до 15 м, реже — до 50–60 м). В отдельных случаях конвективная восходящая миграция углекислого газа реализована по диаклазовым швам, маркирующим донеогеновые сорванные крылья складок поперечного изгиба.

Список источников

1. Алексеев С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. — М. : Стройиздат, 1990. — 320 с.
2. Болысов С. И., Неходцев В. А. Субрельеф и субтерральные процессы как фактор эколого-геоморфологической опасности в городах // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. — 2016. — № 1 (50). — С. 87–105.
3. Болысов С. И., Неходцев В. А. Концепция субрельефа — рельефа подземных полостей // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. — 2020. — № 2. — С. 13–22.
4. Воейкова О. А., Макаров В. И., Несмеянов С. А. Изучение приповерхностных новейших разрывных нарушений платформ при инженерных изысканиях // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2007. — № 3. — С. 267–280.
5. Геологический атлас Москвы : масштаб 1:10 000 : в 10 т. — М. : ГУП «Мосгоргеотрест», 2010. — 3378 с.
6. Геоморфология городских территорий: конструктивные идеи / под ред. Э. А. Лихачевой. — М. : Медиа-ПРЕСС, 2017. — С. 80–93 (А. Н. Маккавеев, Д. В. Федорович), 103–120 (В. А. Неходцев).
7. Григорьева С. В., Макаров В. И. Крупномасштабное картографирование новейшей тектоники платформенных территорий (на примере Москвы) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2010. — № 2. — С. 99–114.
8. Дашко Р. Э., Александрова О. Ю., Котюков П. В., Шидловская А. В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. — 2011. — Вып. 1. — С. 25–71.
9. Кочев А. Д., Зайяц И. Л., Мамонтов В. В. Отчет по изучению инженерно-геологических условий на участках возможного проявления карстово-суффозионных процессов в западной части Москвы (зона А) : [отчет] : инв. № 459287. — М. : ФГБУ «Росгеолфонд» : Гидроспецгеология, 1991. — 499 с.
10. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. — 2014. — № 5 (2). — С. 401–443.
11. Лукашов А. А. Биогенный морфолитогенез в пределах суши // Структура, динамика и эволюция природных геосистем. — М. : Городец, 2004. — С. 69–73.
12. Макаров В. И., Дорожко А. Л., Макарова Н. В., Макеев В. М. Современные геодинамически активные зоны платформ // Геоэкология. — 2007. — № 2. — С. 99–110.
13. Максимович Г. А. Основы карстоведения. — Пермь : Перм. кн. изд-во, 1963. — Т. 1 : Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. — 445 с.
14. Микляев П. С., Макаров В. И., Дорожко А. Л. [и др.]. Радоновое поле Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2013. — № 2. — С. 172–187.
15. Микляев П. С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий : дис. ... д-ра геол.-мин. наук : 25.00.36. — М., 2015 — 307 с.
16. Можарова Н. В., Кулачкова С. А., Лебедь-Шарлевич Я. И. Эмиссия и поглощение парниковых газов в почвах Москвы // Почвоведение. — 2018. — № 3. — С. 372–384.
17. Москва. Геология и город / под ред. В. И. Осипова, О. П. Медведева. — М. : Моск. учеб. и картолитография, 1997. — 398 с.

18. Неходцев В. А. Обзор травертиногенеза в подземных реках Москвы // Спелеология и спелеология. — 2019. — № 10. — С. 296–303.
19. Неходцев В. А. Последствия техногенного погребения рек в городах (на примере Москвы) // Известия РАН. Сер. географическая. — 2021. — № 2. — С. 238–247.
20. Никитин М. Ю. Травертиногенез Ижорского плато в голоцене : дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.25. — СПб., 2015. — 195 с.
21. Степанов В. И. Периодичность процессов кристаллизации в карстовых пещерах // Труды Минералогического музея АН СССР. — М. : Наука, 1971. — Вып. 20. — С. 161–171.
22. Степанов В. И. Структуры и текстуры минеральных агрегатов, образующихся в свободном пространстве пустот // Спелеология в России. — М. : Рос. союз спелеологов, 1998. — Вып. 1. — С. 70–91.
23. Федонкина И. Н., Барс А. П., Макарова В. Г. [и др.]. Объяснительная записка к схематической тектонической карте территории г. Москвы и Лесопаркового защитного пояса масштаба 1:50000 : [отчет] : инв. № 397655. — М. : Центр геология : МГРЭ : ФГБУ «Росгеолфонд», 1982. — 143 с.
24. Юдахин Ф. Н., Щукин Ю. К., Макаров В. И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. — Екатеринбург : УрО РАН, 2003. — 298 с.
25. Селівачова У. М. Модель літогенезу техногенно-геологічної системи підземних виробок (на прикладі дренажних споруд, м. Київ) : дис. ... канд. геол. наук : 04.00.21. — Киев, 2010. — 156 с.
26. Brogi A., Capezzuoli E. Earthquake impact on fissure-ridge type travertine deposition // Geological Magazine. — 2014. — № 151 (6). — Pp. 1135–1143.
27. Brogi A., Capezzuoli E., Alçiçek M. C., Gandin A. Evolution of a fault-controlled fissure-ridge type travertine deposit in the western Anatolia extensional province: the Çukurbağ fissure-ridge (Pamukkale, Turkey) // Journal of the Geological Society. — 2014. — № 171. — Pp. 425–441.
28. Chen J., Zhang D. D., Wang S. [et al.]. Factors controlling tufa deposition in natural waters at waterfall sites // Sedimentary Geology. — 2004. № 166. — Pp. 353–366.
29. Gradziński M. Factors controlling growth of modern tufa: Results of a field experiment // Geological Society London Special Publications. — 2010. — № 336 (1). — Pp. 143–191.
30. Heimann A., Sass E. Travertines in the northern Hula Valley, Israel // Sedimentology. — 1989. — № 36. — Pp. 95–108.
31. Hill C. A., Forti P. Cave Minerals of the World. — 2nd ed. — Huntsville : Nat. Speleological Society, 1997. — 463 p.
32. Kucumow A., Genty D., Chevallier P. [et al.]. X-ray and electron microprobe investigation of the speleothems from Godarville tunnel // X-Ray Spectrometry. — 1997. — № 34. — Pp. 502–508.
33. Kuzmin Y. O. Tectonophysics and recent geodynamics // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. — 2009. — № 45 (11). — Pp. 973–986.
34. Kuzmin Y. O. Induced deformations of fault zones // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. — 2019. — № 55 (5). — Pp. 753–765.
35. Liu Z., He D. Special speleothems in cement-grouting tunnels and their implications of the atmospheric CO₂ sink // Environmental Geology. — 1998. — № 35. — Pp. 258–262.
36. Macleod G., Hall A. J., Fallick A. E. An applied mineralogical investigation of concrete degradation in a major concrete road bridge // Mineralogical Magazine. — 1990. — № 54. — Pp. 637–644.
37. Muir-Wood R., King G. Hydrologic signatures of earthquake strain // Journal of Geophysical Research. — 1993. — № 98. — Pp. 22035–22068.
38. Pentecost A. Travertine. — Berlin ; Heidelberg ; NY : Springer-Verlag, 2005. — 446 p.
39. Sanders D., Werth W., Rott E. Spring-associated limestones of the Eastern Alps: overview of facies, deposystems, minerals, and biota // Facies. — 2011. — № 57. — Pp. 395–416.

References

1. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Schiessl P. *Dolgovechnost zhelezobetona v agressivnykh sredakh* [Durability of reinforced concrete in aggressive environments]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990, 320 p. (In Russian).
2. Bolysov S. I., Nekhodtsev V. A. Subrelief and subterrestrial processes as a factor of ecological and geomorphological hazard in cities. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni S. A. Yesenina* [Bulletin of the Ryazan State University named for S. A. Yesenin]. 2016, iss. 1 (50), pp. 87–105. (In Russian).
3. Bolysov S. I., Nekhodtsev V. A. The concept of subrelief-relief of underground cavities. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5, Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Ser. 5, Geography]. 2020, iss. 2, pp. 13–22. (In Russian).
4. Voeikova O. A., Makarov V. I., Nesmeyanov S. A. Study of near-surface recent faults of platforms during engineering surveys. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoeology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology]. 2007, iss. 3, pp. 267–280. (In Russian).

5. *Geologicheskiy atlas Moskvy: masshtab 1:10,000: v 10 t.* [Geological atlas of Moscow: scale 1:10,000: in 10 vols.]. Moscow, State Unitary Enterprise "Mosgorgeotrest", 2010, 3378 p. (In Russian).
6. *Geomorfologiya gorodskikh territoriy: konstruktivnyye idei* [Geomorphology of urban areas: constructive ideas]. Ed. by E. A. Likhacheva. Moscow, Media-PRESS Publ., 2017, pp. 80–93 (A. N. Makkaveev, D. V. Fedorovich), 103–120 (V. A. Nekhodtsev). (In Russian).
7. Grigoryeva S. V., Makarov V. I. Large-scale mapping of the latest tectonics of platform territories (on the example of Moscow). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology]. 2010, iss. 2, pp. 99–114. (In Russian).
8. Dashko R. E., Aleksandrova O. Yu., Kotyukov P. V., Shidlovskaya A. V. Features of engineering and geological conditions of St. Petersburg. *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitelstvo* [Urban development and geotechnical construction]. 2011, iss. 1, pp. 25–71. (In Russian).
9. Kochev A. D., Zayants I. L., Mamontov V. V. *Otchet po izucheniyu inzhenerno-geologicheskikh usloviy na uchastkakh vozmozhnogo proyavleniya karstovo-suffuzionnykh protsessov v zapadnoy chasti Moskvy (zona A): otchet. inv. № 459287* [Report on the study of engineering-geological conditions in areas of possible manifestation of karst-suffusion processes in the western part of Moscow (zone A): report no. 459287]. Moscow, FGBU "Rosgeolfond" Publ., Gidrospektgeologiya Publ., 1991, 499 p. (In Russian).
10. Kuzmin Yu. O. Modern geodynamics of fault zones: fault formation in real time. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and tectonophysics]. 2014, iss. 5 (2), pp. 401–443. (In Russian).
11. Lukashov A. A. Biogenic morpholithogenesis within the land. *Struktura, dinamika i evolyutsiya prirodnikh geosistem* [Structure, dynamics and evolution of natural geosystems]. Moscow, Gorodets Publ., 2004, pp. 69–73. (In Russian).
12. Makarov V. I., Dorozhko A. L., Makarova N. V., Makeev V. M. Modern geodynamically active zones of platforms. *Geoekologiya* [Geoecology]. 2007, iss. 2, pp. 99–110. (In Russian).
13. Maksimovich G. A. *Osnovy karstovedeniya* [Fundamentals of karstology]. Perm, Perm Publ., 1963, vol. 1: Issues of karst morphology, speleology and karst hydrogeology, 445 p. (In Russian).
14. Miklyaev P. S., Makarov V. I., Dorozhko A. L. et al. Radon field of Moscow. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology]. 2013, iss. 2, pp. 172–187. (In Russian).
15. Miklyaev P. S. *Nauchnyye osnovy otsenki potentsialnoy radonopasnosti platformnykh territoriy* [Scientific basis for assessing the potential radon hazard of platform territories]. Dis. ... of doctor of geological and mineral sciences: 25.00.36. Moscow, 2015, 307 p. (In Russian).
16. Mozharova N. V., Kulachkova S. A., Lebed-Sharlevich Ya. I. Emission and absorption of greenhouse gases in Moscow soils. *Pochvovedeniye* [Soil science]. 2018, iss. 3, pp. 372–384. (In Russian).
17. *Moscow. Geologiya i gorod* [Geology and the city]. Ed. by V. I. Osipov, O. P. Medvedev. Moscow, Moscow ucheb. i cartolithography Publ., 1997, 398 p. (In Russian).
18. Nekhodtsev V. A. Review of travertinogenesis in underground rivers of Moscow. *Speleologiya i speleostologiya* [Speleology and speleology]. 2019, no. 10, pp. 296–303. (In Russian).
19. Nekhodtsev V. A. Consequences of technogenic burial of rivers in cities (on the example of Moscow). *Izvestiya RAN. Ser. geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Ser.]. 2021, iss. 2, pp. 238–247. (In Russian).
20. Nikitin M. Yu. *Travertinogenez Izhorskogo plato v golotsene* [Travertinogenesis of the Izhora Plateau in the Holocene]. Dis. ... of candidate of geography: 25.00.25. St. Petersburg, 2015, 195 p. (In Russian).
21. Stepanov V. I. Periodicity of crystallization processes in karst caves. *Trudy Mineralogicheskogo muzeya AN SSSR*. [Transactions of the Mineralogical Museum of the USSR Academy of Sciences]. Moscow, Nauka Publ., 1971, iss. 20, pp. 161–171. (In Russian).
22. Stepanov V. I. Structures and textures of mineral aggregates formed in the free space of voids. *Speleologiya v Rossii* [Speleology in Russia]. Moscow, Russian Union of Speleologists Publ., 1998, iss. 1, pp. 70–91. (In Russian).
23. Fedonkina I. N., Bars A. P., Makarova V. G. et al. *Obyasnitelnaya zapiska k skhematicheskoy tektonicheskoy karte territorii g. Moskvy i Lesoparkovogo zashchitnogo poyasa masshtaba 1:50,000: otchet. inv. № 397655* [Explanatory note to the schematic tectonic map of the territory of Moscow and the Forest Park Protective Belt at a scale of 1:50,000: report no. 397655]. Moscow, Tsentrgeologiya Publ., MGRE Publ., FGBU "Rosgeolfond" Publ., 1982, 143 p. (In Russian).
24. Yudakhin F. N., Shchukin Yu. K., Makarov V. I. *Glubinnoye stroyeniye i sovremennyye geodinamicheskiye protsessy v litosfere Vostochno-Yevropeyskoy platformy* [Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European platform]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003, 298 p. (In Russian).
25. Selivachova U. M. *Model lithogenezu tekhnogenno-heolohichnoyi systemy pidzemnykh vyrobok (na prykladi drenazhnykh sporud, m. Kyiv)* [Model of lithogenesis of technogenic-geological system of underground works (on the example of drainage structures in Kyiv)]. Thesis of dis. of ... candidate of geology: 04.00.21. Kyiv, 2010, 156 p. (In Ukrainian).

26. Brogi A., Capezzuoli E. Earthquake impact on fissure-ridge type travertine deposition. *Geological Magazine*. 2014, iss. 151 (6), pp. 1135–1143.
27. Brogi A., Capezzuoli E., Alçiçek M. C., Gandin A. Evolution of a fault-controlled fissure-ridge type travertine deposit in the western Anatolia extensional province: the Çukurbağ fissure-ridge (Pamukkale, Turkey). *Journal of the Geological Society*. 2014, iss. 171, pp. 425–441.
28. Chen J., Zhang D. D., Wang S. [et al.]. Factors controlling tufa deposition in natural waters at waterfall sites. *Sedimentary Geology*. 2004, iss. 166, pp. 353–366.
29. Gradziński M. Factors controlling growth of modern tufa: Results of a field experiment. *Geological Society London Special Publications*. 2010, iss. 336 (1), pp. 143–191.
30. Heimann A., Sass E. Travertines in the northern Hula Valley, Israel. *Sedimentology*. 1989, iss. 36, pp. 95–108.
31. Hill C. A., Forti P. *Cave Minerals of the World*. Huntsville, Nat. Speleological Society, 1997, 463 p.
32. Kuczumow A., Genty D., Chevallier P. [et al.]. X-ray and electron microprobe investigation of the speleothems from Godarville tunnel. *X-Ray Spectrometry*. 1997, iss. 34, pp. 502–508.
33. Kuzmin Y. O. Tectonophysics and recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2009, iss. 45 (11), pp. 973–986.
34. Kuzmin Y. O. Induced deformations of fault zones. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2019, iss. 55 (5), pp. 753–765.
35. Liu Z., He D. Special speleothems in cement-grouting tunnels and their implications of the atmospheric CO₂ sink. *Environmental Geology*. 1998, iss. 35, pp. 258–262.
36. Macleod G., Hall A. J., Fallick A. E. An applied mineralogical investigation of concrete degradation in a major concrete road bridge. *Mineralogical Magazine*. 1990, iss. 54, pp. 637–644.
37. Muir-Wood R., King G. Hydrologic signatures of earthquake strain. *Journal of Geophysical Research*. 1993, iss. 98, pp. 22035–22068.
38. Pentecost A. *Travertine*. Berlin, Heidelberg, NY, Springer-Verlag, 2005, 446 p.
39. Sanders D., Werth W., Rott E. Spring-associated limestones of the Eastern Alps: overview of facies, deposystems, minerals, and biota. *Facies*. 2011, iss. 57, pp. 395–416.

Информация об авторах

Неходцев Владимир Алексеевич — научный сотрудник и аспирант кафедры наук о Земле и планетах Института Вайцмана.

Сфера научных интересов: субрельеф («рельеф» подземных полостей) и субтерральные процессы, изотопная геохимия, палеогеография, теоретическая геоморфология, карст.

Лукашов Андрей Александрович — доктор географических наук, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Сфера научных интересов: теоретическая геоморфология, структурная геоморфология, динамическая геоморфология, прикладная геоморфология, поисковая геоморфология, карст.

Information about the authors

Nekhodtsev Vladimir Alekseevich — research assistant and PhD student at the Department of Earth and Planetary Sciences of the Weizmann Institute of Science.

Research interests: sub-relief (“relief” of underground cavities) and subterral processes, isotope geochemistry, paleogeography, theoretical geomorphology, karst.

Lukashov Andrey Aleksandrovich — doctor of geography, professor of the Department of Geomorphology and Paleogeography, Lomonosov Moscow State University.

Research interests: theoretical geomorphology, structural geomorphology, dynamic geomorphology, applied geomorphology, prospecting geomorphology, karst.

Статья поступила в редакцию 10.08.2024; принята к публикации 10.10.2024.

The article was submitted 10.08.2024; accepted for publication 10.10.2024.