

ПЕДОГЕННЫЕ КАРБОНАТЫ В АВТОМОРФНЫХ ПОЧВАХ ПОДТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

М.Ш. Садиров, Э.Ш. Туробов*

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

*sadirovmuhriddin02@gmail.com

Аннотация

Педогенные карбонаты – это основной источник почвенного неорганического углерода, который играет важную роль обмена углерода между почвой и атмосферой. Тем самым оказывает влияние на глобальные климатические процессы. Кроме того, данный процесс еще больше пробуждает интерес к изучению карбонатов, ведь изменение климата – считается одной из актуальных проблем современности [18].

В статье представлены результаты исследования педогенных карбонатов в автоморфных почвах подтаежной зоны юго-восточной части Западной Сибири. Исследования проводились на юго-востоке Западной Сибири (Томь-Яйское междуречье) в подтаежной природной зоне. Изучены процессы, связанные с распределением карбонатных горизонтов в почвенном профиле. Оптическими методами и методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) изучены морфологические особенности карбонатных новообразований, включая хемогенные (гипокутаны) и биогенные образования (биопенки с игольчатыми кристаллами кальцита), а также дана оценка влияния факторов атмосферного осадка и микрорельефа на формирование карбонатных горизонтов в условиях подтаежной зоны юго-восточной части Западной Сибири.

Установлено значительное разнообразие в распределении карбонатов в почвах двухметровой толщи. Выявлены региональные различия в содержании СаО: в Томской области среднее содержание СаО в карбонатных горизонтах составляет 3.0 – 4.0 %, а в Кемеровской области – 6 %. Это указывает на менее интенсивное выщелачивание карбонатов в южной части региона.

Основной формой карбонатных новообразований являются гипокутаны, формирующиеся вблизи верхней линии карбонатного горизонта вокруг корневых каналов. Показано, что генезис гипокутан связан как с поступлением карбонатов из вышележащих горизонтов (модель *perdescendum*), так и с подтягиванием капиллярных растворов при иссушении (модель *perascendum*).

Полученные результаты важны для понимания текущего состояния почвенных карбонатных горизонтов и прогнозирования его изменений в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: педогенный карбонат, неорганический углерод, почвообразующая порода, подтайга, карбонатные новообразования, выщелачивание, микрорельеф, кристаллизации, микроагрегаты, гипокутаны, игольчатый кальцит.

Благодарности. Авторы благодарят канд. геол. мин. наук. И. В. Вологдину и канд. биол. наук. С. В. Лойко за ценные замечания.

Для цитирования: Садиров М.Ш., Туробов Э.Ш. Педогенные карбонаты в автоморфных почвах подтаежной зоны Западной Сибири. *Вестник СВФУ*. 2025;(2): 27-39. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-27-39

PEDOGENIC CARBONATES IN AUTOMORPHIC SOILS OF THE SUBTAIGA ZONE OF THE SOUTHEASTERN PART OF WESTERN SIBERIA

Mukhriddin Sh. Sadirov, Eldor Sh. Turobov*

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

*sadirovmuhriddin02@gmail.com

Abstract

Pedogenic carbonates are the main source of soil inorganic carbon, which plays an important role in the exchange of carbon between the soil and the atmosphere. Thus, it has an impact on global climate processes. In addition, this process further arouses interest in the study of carbonates because climate change is considered one of the urgent problems of our time [18].

The article presents the results of a study of pedogenic carbonates in automorphic soils of the subtaiga zone of the southeastern part of Western Siberia. The research was conducted in the south-east of Western Siberia (Tom-Yayskoye interfluvium) in the subtaiga natural zone. The processes related to the distribution of carbonate horizons in the soil profile have been studied. Morphological features of carbonate neoplasms, including chemogenic (hypocutanes) and biogenic formations (biofilms with needle-like calcite crystals), have been studied using optical methods and scanning electron microscopy (SEM), and the influence of microrelief factors on the formation of carbonate horizons in the conditions of the subtaiga zone of the southeastern part of Western Siberia has been assessed.

A significant diversity in the distribution of inorganic carbons in soils with a thickness of two meters was established. Regional differences in CaO content were identified: in the Tomsk region, the average CaO content in carbonate horizons is 3.0 – 4.0 %, and in the Kemerovo region – 6 %. This indicates less intensive leaching of carbonates in the southern part of the region.

The main form of carbonate neoplasms is hypocutanes, which form near the upper line of the carbonate horizon around the root canals. It was shown that the formation of hypocutanes is linked to both the movement of carbonates from deeper layers (perdescendum model) and the stretching of capillary solutions as they dry out (perascendum model).

The results obtained are important for understanding the current state of soil carbonate horizons and predicting their changes in a changing climate.

Keywords: inorganic carbon, pedogenic carbonate, soil-forming rock, subtaiga, carbonate neoplasms, leaching, microrelief, crystallization, microaggregates, hypocutanes, needle calcite

Acknowledgments. The authors would like to thank the Candidate of Geological Sciences I. V. Vologdina and the Candidate of Biological Sciences S. V. Loiko for valuable comments.

For citation: Sadirov M.Sh., Turobov E.Sh. Pedogenic carbonates in automorphic soils of the subtaiga zone of Western Siberia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2025;(2):27–39 (in Russian) DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-27-39

Введение

К педогенным карбонатам относятся карбонатные минералы, образующие в почвах. Процессы их формирования тесно связаны с генезисом почв и их эволюцией [11, 13, 17]. Это карбонаты кальция, магния, натрия и другие, вновь сформированные или измененные в почве в присутствии угольной кислоты, образующейся при разложении органических остатков и дыхании корней. На процессы формирования, скорость накопления и общее количество педогенных карбонатов влияет большой комплекс различных внешних и внутренних факторов. Внешние факторы, такие как климат, рельеф и организмы, в основном влияют на локализацию и скорость образования почвенных карбонатов, а также регулируют водный баланс и содержание CO_2 в почвенном воздухе. Внутренние почвенные факторы, такие как материнская порода и физико-химические свойства, в основном отвечают за общее количество почвенных карбонатов, их

морфологию и примеси [2, 13, 18]. Целью работы является изучение карбонатного состояния автоморфных почв подтаежной зоны юго-восточной части Западной Сибири.

Карбонатное состояние представляет собой, по определению Хохловой О. С., «совокупность всех форм карбонатного вещества на различных уровнях организации в почве, независимо от его содержания, структуры и состава» [1]. Содержание карбонатов в почве, глубина залегания и форма выделения являются важными признаками диагностики состояния почв. Карбонатный горизонт представляет собой продукт образования, накопления и перераспределения карбонатных веществ в почвах.

Объекты, материалы и методы исследования

Территория исследований расположена на юго-востоке Западной Сибири, в пределах западного макросклона Томь-Яйского междуречья. Объекты исследования располагаются в подтаежной природной зоне. Основные условия формирования почв подтаёжной зоны Западной Сибири связаны с переходным характером ландшафта между тайгой и лесостепью. Этот регион характеризуется сложным сочетанием геоморфологических, климатических и гидрологических факторов, определяющих специфику почвообразования. Рельеф исследуемой территории, включая водораздельные поверхности и их склоны, а также высокие террасы рек, покрывается верхнечетвертными отложениями. Покровные лёссовидные суглинки представляют собой верхнечетвертные осадки [6, 7, 9]. В их гранулометрическом составе преобладает пылеватая фракция – до 40–80 %; содержание CaCO_3 в них высокое – до 6–7 %, местами до 18,5 % [3]. По генезису лёссовидными суглинки, образованными, преимущественно, под воздействием субэразальных факторов. Эти породы выступают в качестве почвообразующих. На них сформированы самые распространенные с благоприятными свойствами почвы Западно-Сибирской равнины. Почвенный покров территории исследований представлен различными типами почв, которые зависят от климатических условий и рельефа местности. Преобладающие лесные почвы являются темно-серыми, серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами [6, 7]. Согласно «Полевому определителю почв России» (2008), темно-серые почвы имеют следующие горизонты – AU-BEL-BT-C, серые – AY-AEL-BEL-BT-C и дерново-подзолистые – AY-EL-BEL-BT-C [8]. Исследуемая территория (от г. Томска до г. Кемерово) характеризуется среднегодовой температурой $+0,9^\circ\text{C}$, количество осадков составляет 568–505 мм [7, 10].

С целью определения распространенности карбонатных новообразований в почвенном профиле и их характеристики в подтаежной зоне изучено 11 профилей. В каждом изученном профиле были образцы верхних горизонтов (BT, BC) и горизонтов почвообразующих пород (C). Важно отметить, что все почвенные разрезы находятся под лесом; из них 8 разрезов находятся на юго-востоке Томской области и 3 разреза – на северо-западе Кемеровской области (рис. 1).

Почвенные профили имеют автоморфный характер, не переувлажняются за счет стока грунтовых или поверхностных вод и залегают в условиях плакорного рельефа, обеспечивающего сток и дренаж. Почвы рассматриваемого региона имеют промывной водный режим [6, 7], что не способствует накоплению больших количеств карбонатных новообразований в почвах. Можно сказать, что педогенные карбонаты почвенного профиля в переходных горизонтах к почвообразующей породе (BC) и в почвообразующей породе (C) проявляются в различных формах.

Подробное морфологическое описание заложенных разрезов и определение их классификационного положения проведены в соответствии с «Классификацией и диагностикой почв России» [8]. Определение концентраций пороодообразующих оксидов методом ИСП-АЭС в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» в Томском государственном университете. Мезоморфологическое строение образцов, отобранных из карбонатных горизонтов, изучено под биноклем. Состав и микроморфологическое строение карбонатных новообразований были изучены с помощью аналитического комплекса сканирующего электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN Mira III LMU в сочетании с усовершенствованной системой анализа элементного состава AZTEC ADVANCED на базе энергодисперсионного детектора Ultimex Max 40 в Томском региональном центре коллективного пользования ТГУ.

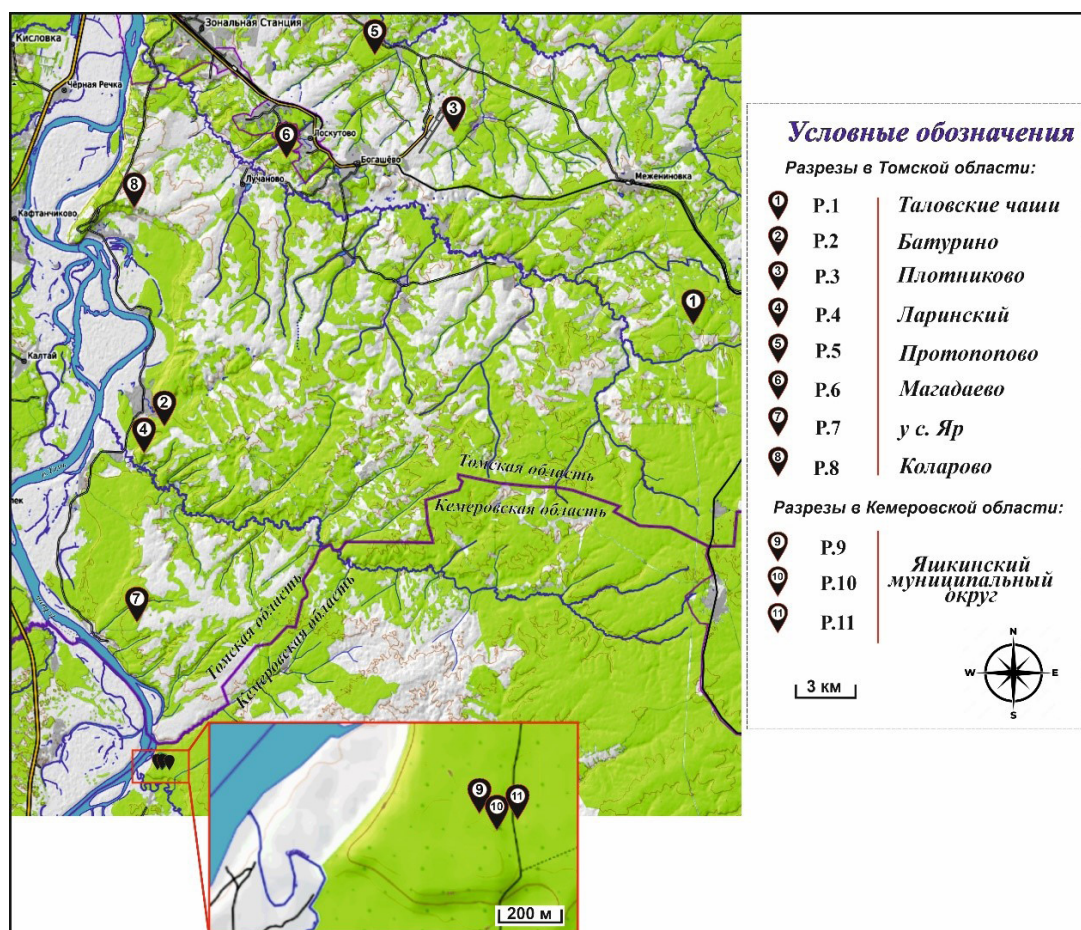


Рис. 1. Исследуемая территория и расположение изученных почвенных профилей

Fig. 1. The territory under study and the objects on which the soil sections are laid

Результаты исследования и их обсуждение

В пределах двухметровой почвенной толщи наблюдается значительное разнообразие в распределении карбонатов в изучаемых почвах (рис. 2). В карбонатных горизонтах автоморфных почвенных профилей, заложенных на юго-востоке Томской области, минимальное содержание CaO составляет 1,8 – 2,6 %, среднее содержание CaO – 3,0 – 4 %, линия вскипания (реакция взаимодействия с 10 %-HCl) находится на глубине 130 см. Максимальное содержание CaO – 5 – 6 % (пиковая линия) обнаруживается на глубине 150 см от поверхности почвы. Данный показатель еще выше в почвенных профилях, заложенных на севере Кемеровской области, то есть среднее содержание CaO составляет 6 %, линии вскипания находится на глубине 120 см, пиковая линия на глубине 140 см (от поверхности почвы), CaO достигает до 7,3 %.

Анализ распределения карбонатов кальция (CaO) в почвенных профилях Томской и Кемеровской областей показывает четкие региональные различия и закономерности вертикального распределения (рис. 3А). Предыдущие исследования [6, 9] в этом районе предполагали, что карбонаты в рассматриваемых почвах связаны с унаследованностью от карбонатных почвообразующих пород. Более высокая концентрация карбонатов и меньшая глубина их залегания в Кемеровской области по сравнению с Томской областью свидетельствуют о менее интенсивном развитии процессов выщелачивания на юге региона, так как глубина залегания карбонатов связана с интенсивностью этого процесса [13, 17, 18]. Подобный характер распределения

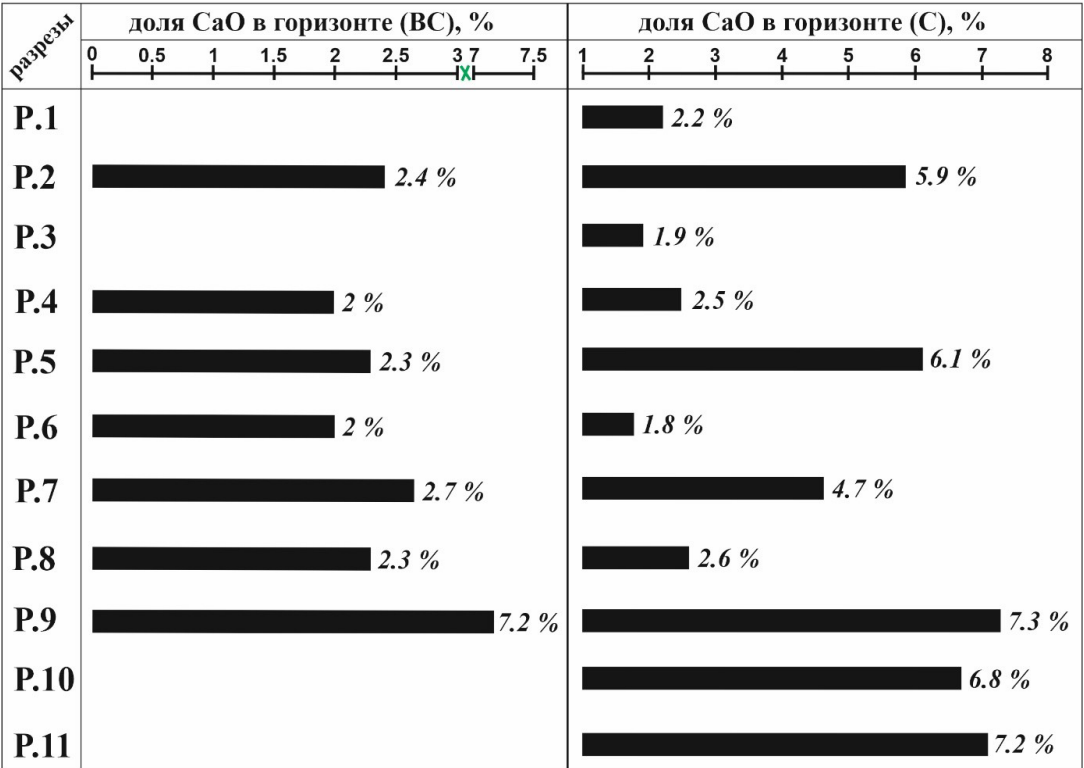


Рис. 2. Доля СаО % в химическом составе исследуемых образцов почвы

Fig. 2. The percentage of СаО % in the chemical composition of the studied soil samples

карбонатов связан с их перераспределением в ходе позднеплейстоценовых и голоценовых этапов почвообразования [2, 16]. Ниже рассмотрим факторы, которые определяют глубину карбонатных горизонтов в почвенном профиле.

Наибольшее количество карбонатов содержится в засушливых почвах, где мало осадков и высокая потенциальная испаряемость значительно ограничивают растворение и выщелачивание карбонатов из почвы [18]. Количество неорганического углерода в почве уменьшается с ростом количества осадков. Таким образом, среднегодовые осадки контролируют глубину выщелачивания и накопления карбонатов. Накопление карбонатов вблизи поверхности почвы (до 50 см) является обычным явлением при осадках <500 мм. В исследованиях, проведенных учеными [13, 18], анализ взаимосвязи между количеством осадков в почве и содержанием неорганического углерода показал четкую закономерность распределения карбонатов в зависимости от климатических условий (рис. 3В).

В подтаежных почвах Западной Сибири Томской области современный уровень атмосферных осадков опускается до 568 мм, а в Кемеровской области осадки достигают 505 мм [10]. Согласно рисунку 3 В, теоретически глубина карбонатного горизонта должна соответствовать в Томской области 70-80 см, а в Кемеровской области 60-70 см от поверхности почв. Фактически же верхняя граница карбонатного горизонта Томской области залегает на глубине среднего 130-140 см, что соответствует осадкам в 650-700 мм. В Кемеровской области карбонатный горизонт залегает на глубине среднего 120-130 см, что соответствует осадкам в 600-650 мм (рис. 3С).

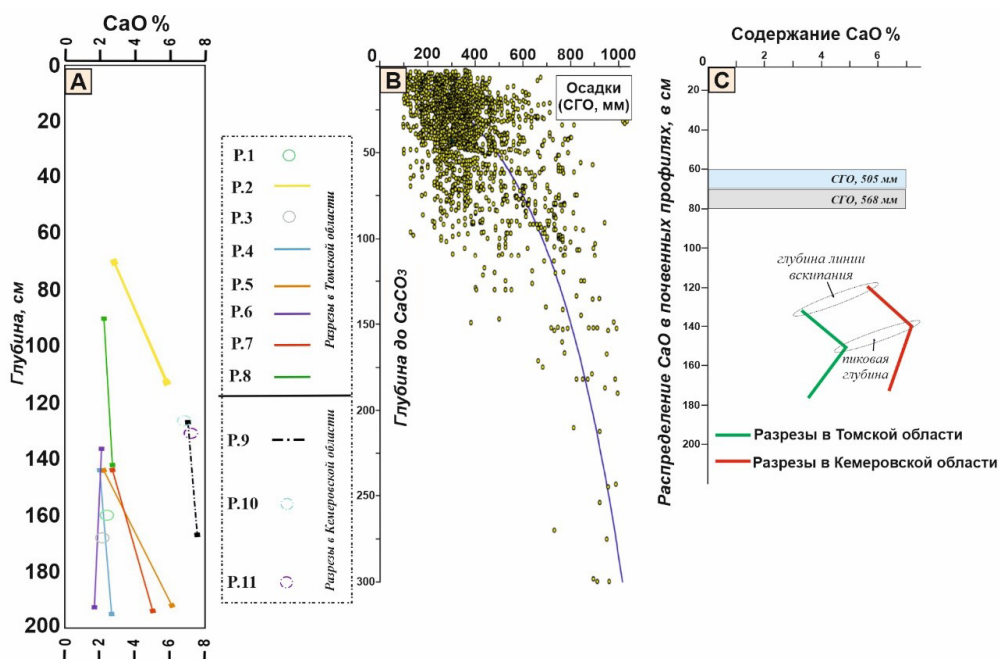


Рис. 3. Зависимость глубины карбонатообразования в почвах от количества осадков.

А – С – распределение карбонатов в горизонтах (BC, C) исследуемых почв; В – корреляция между среднегодовым количеством осадков (СГО) и верхней глубиной почвенного карбонатного горизонта по данным [18]

Примечание: Прямоугольники на рисунке С указывают на теоретическую глубину залегания карбонатных горизонтов при нынешнем уровне атмосферного осадка: голубые – Кемеровская область; серые – Томская область

Fig. 3. The dependence of the depth of carbonate formation in soils on the amount of precipitation.

А – С is the distribution of carbonates in the horizons (BC, C) of the studied soils; В is the correlation between the average annual precipitation and the upper depth of the soil carbonate horizon according to [18]

Note: The rectangles in figure C indicate the theoretical depth of the carbonate horizons at the current level of atmospheric precipitation: blue – Kemerovo region; gray – Tomsk region

Результаты анализов показывают, что глубина залегания карбонатного горизонта в подтаежных почвах Западной Сибири сформировалась при более влажных условиях, чем современные. Это подтверждается значительным превышением фактической глубины над теоретической, рассчитанной по современному уровню атмосферных осадков. Современный гидротермический режим [6, 7, 10] не способствует дальнейшему углублению карбонатного горизонта, а лишь поддерживает уже сформировавшийся почвенный профиль.

Микрорельеф (не превышает в поперечнике и в высоту нескольких метров) разреза почвы также может определить локализацию карбонатного горизонта. Форма микрорельефа напрямую влияет на сохранение и распределение карбонатов в почвенном профиле [6].

Большинство карбонатных горизонтов (P.2, P.5, P.7, P.9, P.10, P.11) приурочены к возвышенным формам рельефа, в которых обеспечиваются идеальные условия для быстрого стока воды, что, в свою очередь, предотвращает глубокое выщелачивание карбонатов из почвенного профиля (рис. 4). В почвенных разрезах, расположенных на склоне или ниже по микрорельефу (P.1, P.3, P.4, P.6, P.8), содержание карбонатных новообразований крайне низкое. Это может быть результатом глубокого выщелачивания карбонатных горизонтов из почвенного профиля.

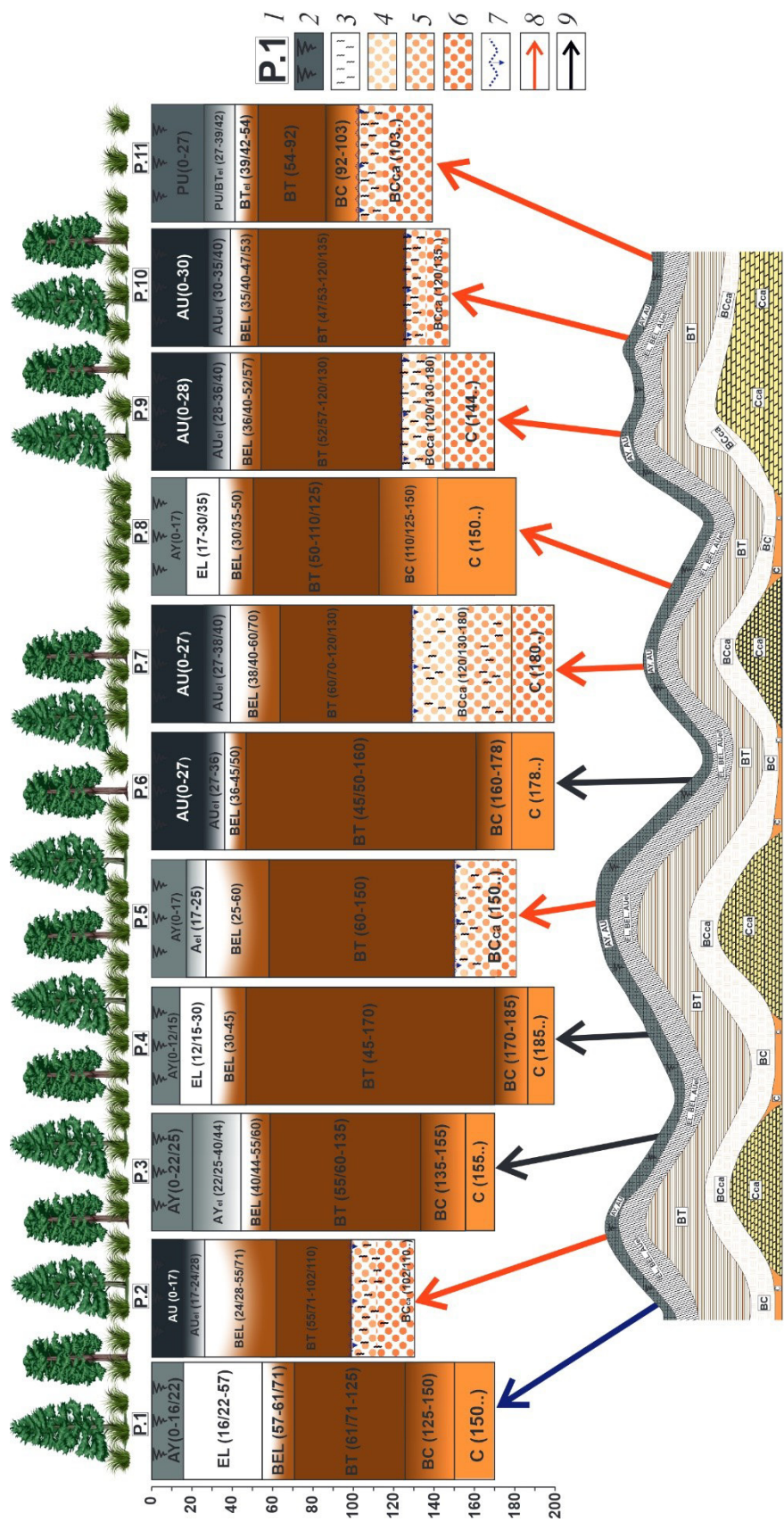


Рис. 4. Условная группировка изученных почв по формам микро рельефа, на которых они сформированы

Примечание: 1 – коды почвенного разреза; 2 – гумусовые горизонты почв; 3 – карбонатные гипокосты; 4 – слабокарбонатная; 5 – среднекарбонатная; 6 – сильнокарбонатная; 7 – граница выщелачивания от HCl; 8 – карбонатные почвенные профили; 9 – бескарбонатные почвенные профили

Fig. 4. A conditional grouping of the studied soils according to the microrelief forms on which they are formed

Note: 1 – soil section codes; 2 – humus horizons of soils; 3 – carbonate hypocostrans; 4 – low carbonate; 5 – medium carbonate; 6 – high carbonate; 7 – boiling point from HCl; 8 – carbonate soil profiles; 9 – carbonate-free soil profiles

Генезис педогенных карбонатов включает в себя различные процессы: осаждение при движении почвенных растворов вверх по профилю в холодные и сухие сезоны, химическое осаждение из минерализованных грунтовых вод [15], перекристаллизация литогенных карбонатов, унаследованных от почвообразующих пород, и биогенные процессы, включая жизнедеятельность бактерий. Именно пути формирования и трансформации карбонатных новообразований определяют их морфологический облик [4].

При анализе форм карбонатных новообразований в почвах подтаежной зоны Западной Сибири основной и отмеченной на всех карбонатных почвенных разрезах формой были гипокутаны. Карбонатные новообразования этой формы встречаются в разрезах (P.2, P.5, P.7, P.9, P.10, P.11) и формируются вблизи верхней линии карбонатного горизонта, вокруг корневых каналов. Гипокутаны образуются в результате проникновения воды в почвенную матрицу и быстрого осаждения CaCO_3 вокруг крупных и средних пор почвы. Быстрое осаждение карбонатов – обычное явление из-за сильного снижения концентрации CO_2 в этих порах по сравнению с микропорами [11, 12, 17, 18].

При увеличении видно (рис. 5А, В, С, D), что часть гипокутан имеет внутреннюю полость, что позволяет рассматривать их генезис как результат заполнения волосяных пор карбонатами, выпадающими из растворов, как поступающими из вышележащих горизонтов профиля (модель *perdescendum*), так и за счёт подтягивания при иссушении, капиллярных растворов к стенкам крупных пор (модель *regascendum*). Существует ещё одно предположение [11], объясняющее их формирование деятельностью корневой системы растений: быстрое поглощение влаги корнями обуславливает интенсивную кристаллизацию карбонатов из растворов. Эта гипотеза объясняет форму данных новообразований, которые часто образуют как бы чехол вокруг отмерших корней. Эта форма была отмечена в разрезе почвы, заложенном в лесном массиве у с. Яр (P.7). Когда корни растений активно поглощают влагу из почвы, растворенные вещества, такие как карбонаты, могут оставаться в растворе. При быстром высыхании или изменении условий

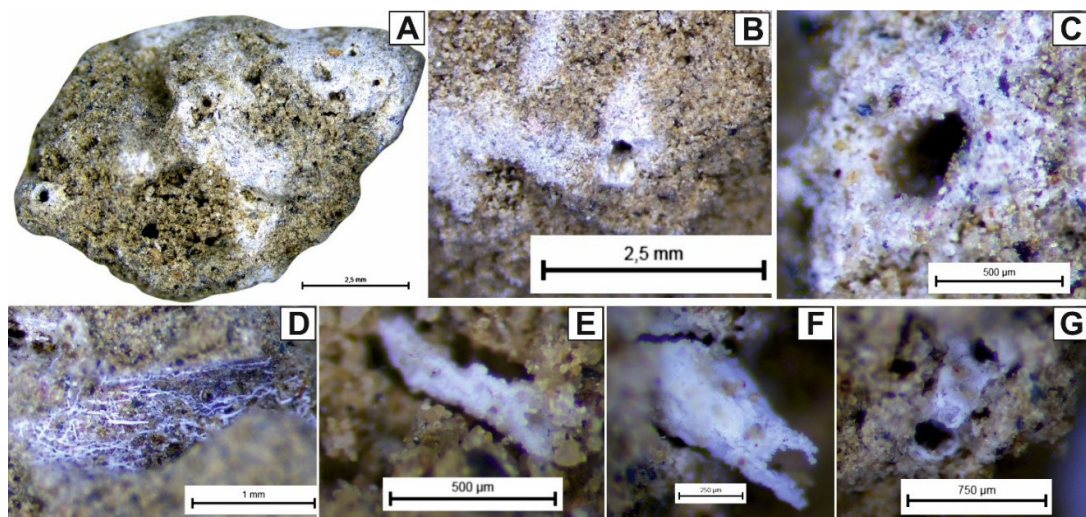


Рис. 5. Морфология гипокутан в изучаемых почвах

Примечание: А-В-С-Д – агрегаты кальцита вокруг корневых каналов; Е-F-G – чехол вокруг отмерших корней из мелкозернистого кальцита. Почвенный горизонт: А – P.10 (120-130); В – P.5 (150-180); С – P.2 (110-120); D – P.9 (150-170) Е-F-G-P.7 (180-200). Фотографии под бинокляром

Fig. 5. Morphology of hypocotyles in the studied soils

Note: A-B-C-D are calcite aggregates around root canals; E-F-G is a cover around dead roots made of fine-grained calcite. Soil horizon: A – P.10 (120-130); B – P.5 (150-180); C – P.2 (110-120); D – P.9 (150-170) E-F-G-P.7 (180-200). Photos under binoculars

(например, повышении температуры) эти вещества начинают кристаллизоваться. Подобные процессы чаще всего наблюдаются в условиях, где почва имеет высокую концентрацию карбонатов. Кроме того, активная деятельность корней может изменять местные условия влажности и pH, что также способствует кристаллизации кальцита. На рисунке 5E,F,G показаны формы карбонатных новообразований, которые возможно образовались в результате вышеупомянутых процессов.

Субмикроморфологическое строение: гипокутаны обычно состоят из микритовых и микро-спаритовых кристаллов, формируются в результате постепенного осаждения из коллоидного раствора при оптимальных концентрациях ионов кальция. Размер агрегатов составляет до 30 мкм (рис. 6A). На РЭМ-снимках можно увидеть большое количество игольчатых карбонатных

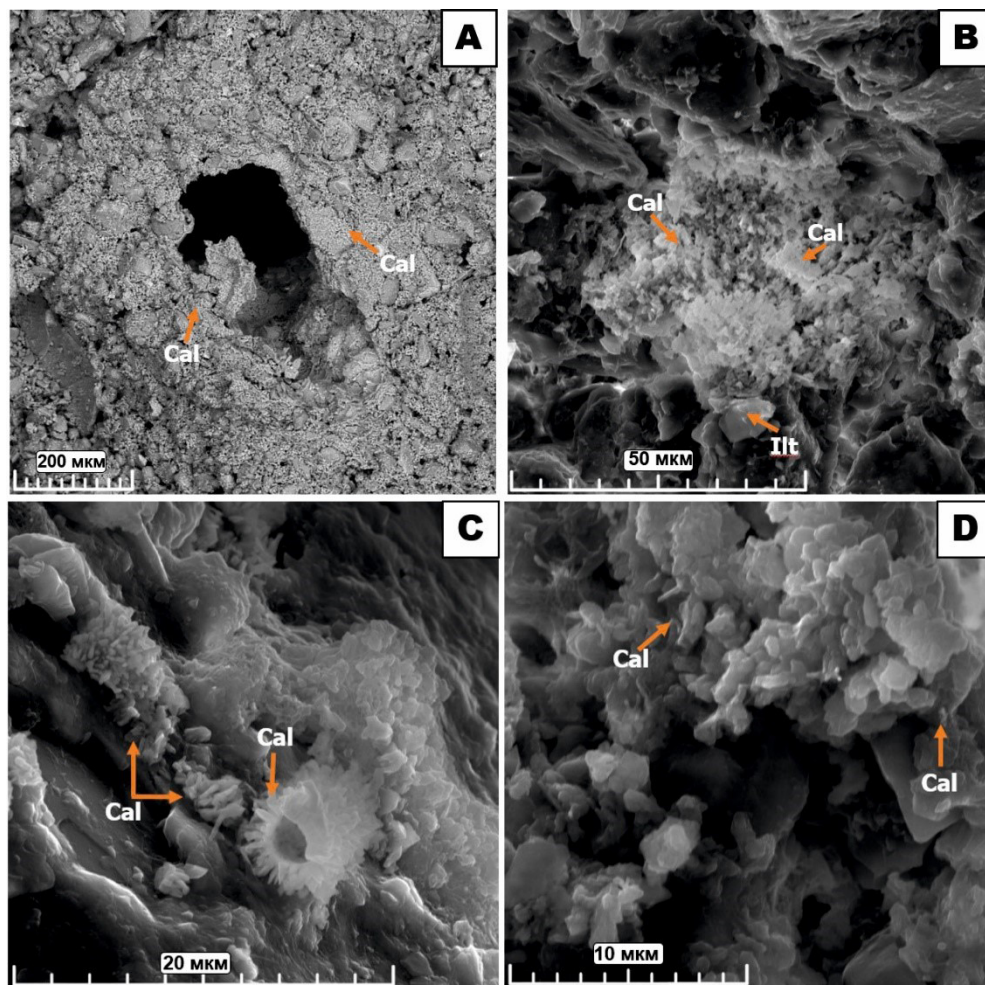


Рис. 6. Строение и состав гипокутан в изучаемых почвах

Примечание: А – строение карбонатной пленки вокруг корневого канала; В – микростроение агрегатов кальцита в гипокутанах; С – пластинчатые и игольчатые кристаллики кальцита на поверхности коллоидной пленки вокруг микропоры; D – субпараллельная ориентировка пластинчатых кристаллов кальцита. Почвенный горизонт: А – P.2 (110-120); В – P.10 (120-130); C-D – P.11 (110-130). Снимки РЭМ сделаны в режиме BSE (A), SE (B, C, D). Условные обозначения: Cal – кальцит, Ill – иллит (тонкие чешуйки)

Fig. 6. Structure and composition of hypocutanes in the studied soils

Note: A – the structure of the carbonate film around the root canal; B – the microstructure of calcite aggregates in hypocutanes; C – is on the surface of a collomorphic film with individual calcite crystals; D – is the subparallel orientation of lamellar calcite crystals. Soil horizon: A – P.2 (110-120); B – P.10 (120-130); C-D – P.11 (110-130). The REM images were taken in BSE (A) and SE (B, C, D) mode. Symbols: Cal – calcite, Ill – illite (thin flakes)

кристаллов, что свидетельствует о том, что коллоидный раствор часто насыщен и перенасыщен солями кальция (рис. 6B). Кроме того, встречаются кристаллики кальцита пластинчатой формы (толщиной менее 1 мкм внутри агрегатов ориентированы субпараллельно), как в виде отдельных агрегатов (рис. 6C), так и в виде кристалломорфной пленки вокруг пор (рис. 6D). Развитие таких структур требует стабильных условий осаждения и относительно низкой степени насыщенности раствора.

В карбонатных горизонтах изучаемых почв следующей наиболее распространенной формой карбонатных новообразований являются биогенные пленки. Микростроение этой формы новообразований изучалась в разрезах (P.2, P.9). Считается, что эти формы образуются непосредственно в результате биологических процессов, при которых удлиненные кристаллы образуются в результате биоминерализации грибов внутри пучков мицелия и впоследствии высвобождаются при распаде органического вещества стенок грибов [11, 12]. Биологическая активность увеличивает концентрацию ионов Ca^{2+} внутри организмов (например, в клеточных стенках растений, в гифах грибов) или снижает её (например, вдоль корней из-за притока массы воды к корню, под гнездами термитов из-за их характерного остаточного скопления) [5, 18].

Биогенные пленки представляют собой агрегаты из игольчатых кристалликов кальцита длиной до 3 мкм, которые нарастают вокруг органических образований, таких как всасывающие корни и гифы грибов (рис. 7).

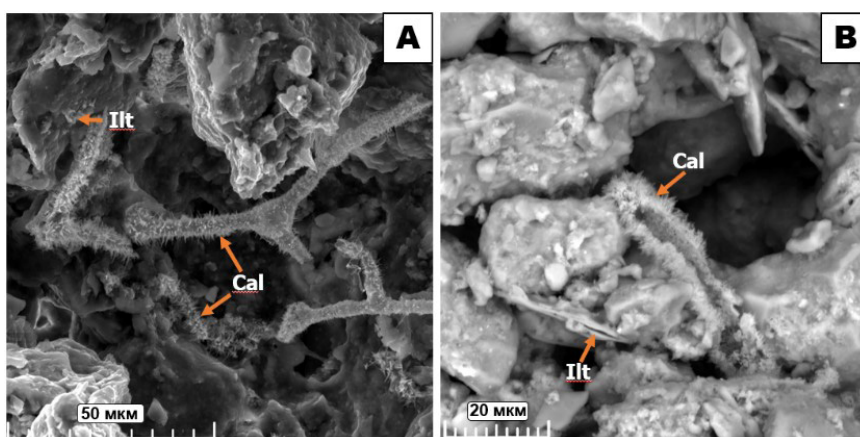


Рис. 7. Строение и состав биогенных карбонатных новообразований в изучаемых почвах

Примечание: А – В – игольчатый кальцит. Почвенный горизонт: А – P.2 (110-120); В – P.5 (150-180). Снимки РЭМ сделаны в режиме SE (А) и BSE (В). Условные обозначения: Cal – кальцит, Ilt – иллит (тонкие чешуйки)

Fig. 7. Structure and composition of biogenic carbonate neoplasms in the studied soils

Note: A – B is needle calcite. Soil horizon: A – P.2 (110-120); B – P.5 (150-180). SEM images were taken in SE (A) and BSE (B) mode. Symbols: Cal–calcite and Ilt–illite (thin flakes)

Закключение

В результате комплексных исследований было выявлено, что на исследуемой территории локализация карбонатных горизонтов различна. Данный процесс контролируется такими факторами как среднегодовое количество осадков и микрорельеф.

Установлено, что в изучаемых почвах, карбонатный горизонт сформировался в более влажных условиях, чем в современных. Действующий гидротермический режим не способствует дальнейшему углублению карбонатного горизонта.

Наблюдаемые закономерности подтверждают важную роль микрорельефа в формировании карбонатных горизонтов: микроповышения создают условия для сохранения карбонатов благо-

даря быстрому стоку воды. Склоны и нижележащие участки характеризуются интенсивным выщелачиванием карбонатов.

В почвах исследуемой территории встречаются карбонатные новообразования различного генезиса – хемогенные, такие как гипокутаны, и биогенные – биопленки, представляющие собой агрегаты из игольчатых кристаллов кальцита.

Таким образом, изучение карбонатных новообразований в почвах требует комплексного подхода, включающего анализ факторов формирования, особенностей строения и состава, что имеет значение для понимания современного состояния почвенного покрова и прогнозирования его изменений. Будущие исследования могут сосредоточиться на влиянии климатических изменений на динамику этих процессов и их последствия для экосистем региона. Это позволит более глубоко понять, как изменения окружающей среды могут воздействовать на устойчивость почвенных систем и их способность поддерживать биологическое разнообразие.

Литература

1. Булышева А.М., Хохлова О.С., Бакунович Н.О. и др. Изменение карбонатного состояния черноземов Приазовья при переходе их из пашни в залежь. *Почвоведение*. 2020;(8):1025–1038. DOI: 10.31857/S0032180X2008002X.
2. Голубцов В.А., Черкашина А.А., Снытко В.А. Первые данные о возрасте и условиях формирования карбонатных новообразований в позднелепестовых и голоценовых почвах Верхнего Приангарья. *Докл. РАН*. 2019; 486(6):727–732. DOI: 10.31857/S0869-56524866727-732.
3. Евсеева Н.С., Петров З.Н., Квасникова А.И. и др. Эрозия почв при снеготаянии в агроландшафтах юга Томской области: факторы развития, интенсивность и динамика. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022;333(3):196–205.
4. Кузнецова А.М., Хохлова О.С. Морфология карбонатных новообразований в почвах различных типов. *Литология и полезные ископаемые*. 2010; (1):99–110.
5. Кузнецова А.М., Хохлова О.С., Остерриет М. Биогенные и хемогенные кальциевые новообразования в моллисолях на лессах Аргентинской Пампы. *Почвоведение*. 2011;(1):82–89.
6. Лойко С.В. Закономерности формирования почвенного покрова предгорных ландшафтов Томь-Яйского междуречья: Дис. канд. биол. наук. Томск: 2012:186.
7. Лойко С.В. *Природные условия западного макросклона Томь-Яйского междуречья: материалы клевой части Первой Всероссийской школы – конференции по лесной экологии «Современные проблемы и методы лесной экологии»* (Томск, 25-30 августа 2013 г.). Лойко С.В., Гераско Л.И., Кулижский С.П. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета; 2013:56.
8. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный ин-т. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
9. Середина В.П., Спирина В.В. *Почвообразование в подтаежной зоне Западной Сибири*. Томск: Изд-во НТЛ; 2011:131.
10. Филандышева Л.Б., Ромашова Т.В., Юркова К.Д. *Географические особенности г. Томска и динамика сезонных ритмов в условиях глобального изменения климата*. Томск: Изд-во Том. ун-та; 2021:254.
11. Barta G. Secondary carbonates in loess-paleosol sequences: a general review. *Centr. Eur. J. of Geosci.* 2011;3(2):129–146.
12. Durand N, Monger HC, Canti MG. Calcium carbonate features / Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Amsterdam: Elsevier. 2010; 149–194.
13. Golubtsov V, Cherkashina A, Khokhlova O. Carbonate profile of soils in the Baikal region: structure, age, and formation conditions. *Eurasian Soil Science*. 2019;52: 1515–1532. <https://doi.org/10.1134/S1064229319120056>.
14. Liu ZH. Is pedogenic carbonate an important atmospheric CO₂ sink? *Chinese Sci Bull.* 2011;56: 3794–3796. doi:10.1007/s11434-010-4288-8.
15. Monger HC, Kraimer RA, Khresat S, et al. Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. *Geology*. 2015; 43: 375–378.
16. Monger HC. Soils as Generators and Sinks of Inorganic Carbon in Geologic Time. In: Hartemink A, McSweeney K. (eds) *Soil Carbon. Progress in Soil Science. Springer, Cham*. 2014; 27–36. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_3.

17. Verrechia E.P. Pedogenic carbonates: Encyclopedia of Geobiology. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer. 2011; 721–725.
18. Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: Forms and formation processes. *Earth-Sci. Rev.* 2016; 157: 1–17.

References

1. Bulysheva A.M., Khokhlova O.S., Bakunovich N.O., et al. The change in the carbonate state of the chernozems of the Azov region during their transition from arable land to fallow land. *Soil Science*. 2020;(8):1025–1038. DOI: 10.31857/S0869-56524866727-732 (in Russian).
2. Golubtsov V.A., Cherkashina A.A., Snytko V.A. The first data on the age and conditions of formation of carbonate neoplasms in the Late Pleistocene and Holocene soils of the Upper Angara region. *Dokl. RAS*. 2019;486(6):727–732 (in Russian).
3. Evseeva N.S., Petrov Z.N., Kvasnikova A.I., et al. Soil erosion during snowmelt in the agricultural landscapes of the south of the Tomsk region: development factors, intensity, and dynamics. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2022;333(3):196–205 (in Russian).
4. Kuznetsova A.M., Khokhlova O.S. Morphology of carbonate neoplasms in soils of various types. *Lithology and minerals*. 2010;(1):99–110 (in Russian).
5. Kuznetsova A.M., Khokhlova O.S., Osterriet M. Biogenic and chemogenic calcium neoplasms in mollisols on loess of the Argentine Pampa. *Soil Science*. 2011;(1):82–89 (in Russian).
6. Loiko S.V. Patterns of formation of the soil cover of the foothill landscapes of the Tom-Yaysky interfluvium. Candidate's dissertation (Biology). Tomsk. 2012:186 (in Russian).
7. Loiko S.V. *Natural conditions of the western macroslope of the Tom-Yaysky interfluvium: materials for the field part of the First All-Russian School-conference on Forest Ecology "Modern problems and methods of forest ecology"* (Tomsk, August 25–30, 2013). Loiko SV, Gerasko LI, Kulizhsky SP. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University; 2013:56. (in Russian).
8. Field soil determinant of Russia. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute; 2008:182 (in Russian).
9. Seredina V.P., Spirina V.V. *Soil formation in the subtaiga zone of Western Siberia*. Tomsk: NTL Publishing House; 2005:284 (in Russian).
10. Filandysheva L.B., Romashova T.V., Yurkova C.D. *Geographical features of Tomsk and the dynamics of seasonal rhythms in the context of global climate change*. Tomsk: Publishing House Vol. University; 2021. 254 p (in Russian).
11. Barta G. Secondary carbonates in loess-paleosol sequences: a general review. *Centr. Eur. J. of Geosci.* 2011;3(2):129–146.
12. Durand N., Monger H.C., Canti M.G. Calcium carbonate features / Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Amsterdam: Elsevier. 2010;149–194.
13. Golubtsov V., Cherkashina A., Khokhlova O. Carbonate profile of soils in the Baikal region: structure, age, and formation conditions. *Eurasian Soil Science*. 2019;52: 1515–1532. <https://doi.org/10.1134/S1064229319120056>.
14. Liu Z.H. Is pedogenic carbonate an important atmospheric CO₂ sink? *Chinese Sci Bull.* 2011;56: 3794–3796. doi:10.1007/s11434-010-4288-8.
15. Monger H.C., Kraimer R.A., Khresat S., et al. Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. *Geology*. 2015;43: 375–378.
16. Monger H.C. Soils as Generators and Sinks of Inorganic Carbon in Geologic Time. In: Hartemink A., McSweeney K. (eds) *Soil Carbon. Progress in Soil Science*. Springer, Cham. 2014; 27–36. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_3.
17. Verrechia E.P. Pedogenic carbonates: Encyclopedia of Geobiology. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer. 2011; 721–725.
18. Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: Forms and formation processes. *Earth-Sci. Rev.* 2016;157: 1–17.

Сведения об авторах

САДИРОВ Мухриддин Шамсиддин угли – магистрант, инженер-исследователь центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» геолого-географического факультета, «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, Российская Федерация

E-mail: sadirovmuhriddin02@gmail.com

ТУРОБОВ Элдор Шавки угли – магистрант, инженер-исследователь центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» геолого-географического факультета, «Национальный исследовательский Томский государственный университет» г. Томск, Российская Федерация

E-mail: turoboveldor@gmail.com

About the authors

M. Shamsiddin ugli SADIROV – Master’s student, research engineer, Center for Collective Use “Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems”, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

E-mail: sadirovmuhriddin02@gmail.com

E. Shavki ugli TUROBOV – Master’s student, Research Engineer, Center for Collective Use “Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems”, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

E-mail: turoboveldor@gmail.com

Вклад авторов

Садиров М. Ш. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, визуализация

Туробов Э. Ш. – методология, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования

Authors contribution

Sadirov M. Sh. – conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, visualization.

Turobov E. Sh. – methodology, investigation, resources.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest

Поступила в редакцию / Submitted 17.03.25

Принята к публикации / Accepted 16.04.25