

## АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

УДК 631.48 (571.5)

doi: 10.17223/19988591/39/1

**В.А. Голубцов**

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия*

### **Карбонатные новообразования в почвах Байкальского региона: процессы формирования и значение для палеопочвенных исследований**

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-04-00092).

*На данный момент вопросы, касающиеся строения, хронологии и специфики формирования педогенных карбонатов в резкоконтинентальных областях юга Восточной Сибири, остаются практически незатронутыми. Выполнено обобщение сформировавшихся за последние годы представлений о механизмах формирования карбонатных новообразований почв, а также их связи с условиями среды и процессами почвообразования. Оценены пути поступления карбонатов и основные факторы их аккумуляции в профиле почв. Описаны особенности вещественного и изотопного состава карбонатных новообразований в почвах, формирующихся в различных климатических условиях. На основании собственных исследований приводятся данные о разнообразии карбонатных аккумуляций в почвах Байкальского региона, их вещественном составе и роли в качестве палеогеографических индикаторов. Детально рассмотрены следующие формы карбонатных новообразований: ризолиты, игольчатый кальцит, гипокутаны, белоглазка, нодулы, кутаны, лессовые куколки.*

**Ключевые слова:** карбонаты; педогенные карбонатные новообразования; стабильные изотопы; почвы; палеореконструкции.

### **Введение**

Первостепенное значение при изучении эволюции почв имеет выделение устойчивых эволюционно-генетических признаков, маркирующих отдельные этапы педогенеза, особенно тех, что поддаются датированию методами абсолютной геохронологии. К таким признакам относятся новообразования карбонатов. Процессы их формирования тесно связаны с генезисом почв и их эволюцией. Особенности распределения и морфологии педогенных карбонатов в профиле почв отражают направленность и интенсивность педогенеза [1, 2]. Их изотопный состав несет информацию о палеоклиматических условиях, составе древней растительности [3–5] и динамике процессов ре-

льефообразования [6]. Применение различных методов датирования педогенных карбонатов позволяет решать вопросы геохронологии [7–10].

Подобные сведения представляют значительную ценность для познания закономерностей эволюции почв и ландшафтов, что обусловило большой интерес исследователей к педогенным карбонатам. За счет этого в течение последних лет произошло стремительное накопление фактических данных, сочетавшееся с глубоким совершенствованием методик исследований [11–13]. Появилась необходимость создания новых обобщающих работ.

В настоящее время в Байкальском регионе большинство палеоэкологических исследований сосредоточено на отложениях озера Байкал и прилегающих к нему небольших озер и торфяников. Получен значительный объем данных, характеризующих региональные особенности развития ландшафтов. Гораздо меньше внимания уделяется палеопочвенным исследованиям, которые позволяют получать информацию с большим пространственным разрешением за счет формирования почв *in situ*. Поэтому педогенные карбонаты являются новым многообещающим инструментом для исследования палеоэкологических изменений в регионе. Тем не менее на данный момент вопросы, касающиеся строения, хронологии и специфики их формирования в почвах Байкальского региона, остаются практически незатронутыми.

В данной работе мы обобщаем сформировавшиеся за последние годы представления о разнообразии, вещественном составе, факторах и механизмах формирования карбонатных новообразований почв и дополняем их материалами собственных исследований на территории Байкальского региона.

### **Пути поступления карбонатов в почвы и основные факторы их аккумуляции**

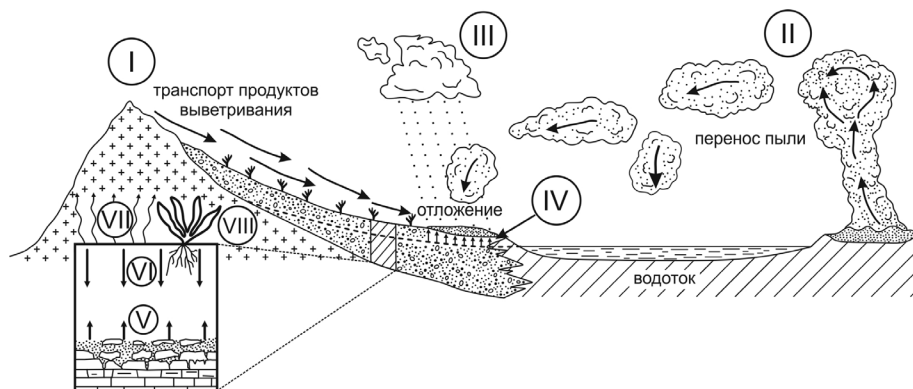
Выделяются следующие источники и механизмы поступления карбонатов в почвы: 1) унаследованность от материнской породы; 2) осаждение из растворов, образованных в результате выветривания содержащих кальций минералов; 3) осаждение карбонатов, вызванное увеличением концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  при дегазации за счет эмиссии  $\text{CO}_2$ ; 4) отложение карбонатной пыли на поверхность почвы с последующим перемещением карбонатов вглубь профиля в составе растворов; 5) осаждение в результате объединения  $\text{Ca}^{2+}$ , поступающего с атмосферными осадками, с  $\text{HCO}_3^-$ , находящимся в составе почвенных растворов; 6) привнос с грунтовыми водами [14].

Таким образом, пути поступления карбонатов в почвы могут быть условно разделены на две группы: 1) формирование карбонатов непосредственно в почве и 2) поступление их извне. В первом случае синтез карбонатов происходит в результате процесса карбонатизации при выветривании содержащих кальций минералов. Следствием этого процесса является появление растворов щелочей и щелочных земель слабых концентраций, которое в присутствии угольной кислоты сопровождается образованием карбонатов

и бикарбонатов [15]. Такой процесс может протекать практически в любых климатических условиях. Однако в гумидных областях результат процесса может быть диагностирован только в почвенном растворе. Твердофазный эффект карбонатизации (карбонатные новообразования) будет наблюдаться лишь в аридных условиях, где синтез сопряжен с аккумуляцией карбонатов [16].

Второй путь поступления карбонатов в почвы – перемещение продуктов выветривания карбонатных пород любыми геологическими агентами. В зависимости от способа переноса и климатических условий источниками карбонатов могут быть атмосферные осадки, пыль, грунтовые и поверхностные воды. В большинстве семиаридных и аридных областей основным источником кальция являются пыль и атмосферные осадки [17]. Особая роль в регулировании поступления карбонатов в почвы и их дальнейшей динамике принадлежит растениям [18].

Обобщенная схема источников и механизмов поступления карбонатов в почвы представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Основные источники и механизмы поступления карбонатов в почвы (по [13, 14, 17] с дополнениями): I – выветривание горных пород; II – развевание пыли; III – атмосферные осадки; IV – грунтовые воды; V – выветривание карбонатсодержащих пород и минералов; VI – нисходящее перемещение карбонатов, поступивших в составе наносов; VII – эмиссия  $\text{CO}_2$ , испарение, эвапотранспирация, микробная деятельность; VIII – разложение органических остатков [Fig. 1. The main sources and mechanisms of carbonate input into soils (according to [13, 14, 17] with additions). I - Weathering of rocks; II - Dust transfer; III - Precipitations; IV - Groundwater; V - Weathering of carbonate-bearing rocks and minerals; VI - Downward migration of carbonates received with sediments; VII -  $\text{CO}_2$  emission, evapotranspiration, microbe activity; VIII - Decomposition of organic residues]

Многообразие путей поступления карбонатов в почвы диктует необходимость четкого разграничения собственно педогенных (вторичных) карбонатов и других их форм. В почвах могут быть встречены генетически принципиально различные формы карбонатов, из которых основные:

– *литогенные карбонаты*, унаследованные от почвообразующих пород. Часто характеризуются магниевым составом, более крупными размерами

минеральных зерен, тяжелым изотопным составом углерода [19]. В почвах они могут встречаться в виде обломочных включений, конкреций, раковин моллюсков, но чаще находятся в дисперсном состоянии [20]. Иногда литогенные карбонаты обнаруживаются в составе педогенных новообразований [21];

– *гидрогенные карбонаты* формируются за счет привноса боковым или восходящим током капиллярных растворов от грунтовых вод. Отличия гидрогенных и педогенных карбонатов следующие: 1) прослой гидрогенных карбонатов имеют резкие границы с вмещающей массой как в нижней, так и в верхней частях; 2) толща гидрогенных карбонатов массивна (в ней отсутствуют горизонты либо они выражены слабо); 3) не содержат вертикальных следов корневых каналов и структурных отдельностей; 4) гидрогенные карбонаты не могут залегать над горизонтом иллювиирования ила [22];

– к *педогенным карбонатам* относятся аутигенные карбонатные минералы, формирующиеся в почвах [13]. Это карбонаты кальция, магния, натрия и другие, новообразованные или преобразованные в почвах при участии угольной кислоты, продуцируемой при разложении органических остатков и дыхании корней [18].

Формирование собственно педогенных карбонатов происходит под влиянием следующих факторов. В зависимости от гидротермических условий поступившие в почву карбонаты или полностью вымываются из почвенного профиля, или подвергаются локальному перемещению [18], которое имеет элювиально-иллювиальный характер [15, 17, 23]. Основными физико-химическими факторами, влияющими на динамику карбонатов в почвах, являются концентрация почвенных растворов, температура, парциальное давление  $\text{CO}_2$ . Эти факторы определяются особенностями гидротермического и газового режимов почв, а также активностью биоты [23–25]. Благодаря деятельности живых организмов формируется большое разнообразие биогенных почвенных карбонатов [26]. К ним относят игольчатый кальцит, трубки и чехлики, ризокреции и ризолиты, окарбоначенные экскременты и клетки растений, образующиеся путем заполнения клеточных ячеек кальцитом [26, 27], а также кристаллы шавелевокислого кальция – вевеллита, формирующегося в растительных клетках [11, 18].

### **Вещественный и изотопный состав педогенных карбонатных новообразований**

Минеральная фаза аккумуляций вторичных карбонатов представлена, главным образом, кальцитом ( $\text{CaCO}_3$ ) [11, 20, 24], магниезиальным кальцитом ( $\text{Ca}_x\text{Mg}_{1-x}(\text{CO}_3)$ ) и доломитом ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) [14]. Присутствие педогенного кальцита характерно для хорошо дренируемых почв, формирующихся в семигумидных, семиаридных и аридных климатах [28, 29] с относительно низкими суммами атмосферных осадков ( $< 800$  мм/год) [28]. Арагонит ( $\text{CaCO}_3$ ) обнаруживается в почвах достаточно редко в силу своей неустой-

чивости [11, 14]. В почвенной среде он постепенно перекристаллизовывается в кальцит [11]. Тем не менее известны случаи его нахождения в составе некоторых почвенных новообразований [8, 21, 24]. Сидерит ( $\text{FeCO}_3$ ) обнаруживается в почвах в форме кутан на стенках пор и мелких инфиллингов [11]. Его формирование характерно для плохо дренируемых почв с восстановительным режимом [30]. Хотя все минералы группы карбонатов, встречающиеся в почвах, могут быть унаследованы от почвообразующих пород, доломит и арагонит относятся к литогенным практически всегда. Случаи формирования доломита в почвах очень редки [31, 32].

Основным компонентом химического состава новообразований является карбонат кальция, который обычно составляет более 80% их массы [33, 34]. На 98% из кальцита состояли аккреционные белоглазки, обнаруженные нами в черноземах Селенгинского среднегорья. Исследования карбонатных кутан в черноземах Южного Прибайкалья показали, что содержание карбоната кальция в пределах различных слоев одного новообразования может варьировать от 77 до 96% [35]. Минимальные значения данного компонента (34%) зафиксированы К.Е. Пустовойтовым в кутанах криоаридных почв Северо-Востока Сибири [34]. Подобные вариации обусловлены различными примесями в составе новообразований. Это могут быть включения кварца, силикатного глинистого материала, внедренного из вмещающей почвенной массы, пленки полуторных оксидов Fe и Al на поверхности кристаллических индивидов минералов, аморфных и слабоокристаллизованных форм кремнезема, гумуса. Все эти примеси отмечены в карбонатных кутанах криоаридных почв Тувы [36], Северо-Востока Сибири [34] и в черноземах Байкальского региона [35]. Их интерпретация использована в указанных работах для диагностики процессов иллювиирования и отклика почв на климатические изменения голоцена.

Углерод попадает в состав педогенных карбонатов из растворенного  $\text{CO}_2$  в почвенном растворе. Дыхание корней и микроорганизмов, разложение растительного опада и органического вещества почв являются основными источниками  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе во время вегетационного периода [37]. Однако в промерзающих почвах или почвах с очень низкими скоростями дыхания (например, в пустынях) концентрация  $\text{CO}_2$  частично контролируется диффузией атмосферного диоксида углерода в почву [3]. Источником кислорода в педогенных карбонатах является кислород почвенной воды [3, 38].

Изотопный состав углерода педогенных карбонатов контролируется значением  $\delta^{13}\text{C}$  почвенного  $\text{CO}_2$ , которое, в свою очередь, является производной от смешения двух изотопно различных источников: атмосферного и биологически выделенного (почвенного)  $\text{CO}_2$  [3, 38, 39]. Значение  $\delta^{13}\text{C}$  атмосферного  $\text{CO}_2$  обычно находится в пределах от  $-6$  до  $-7\text{‰}$ . Значения  $\delta^{13}\text{C}$   $\text{CO}_2$ , выделяемого растениями, фотосинтез которых идет по циклу Кальвина ( $\text{C}_3$ ) или Хэтча–Слэка ( $\text{C}_4$ ), существенно различаются и в среднем составляют  $-26$  и  $-12\text{‰}$  соответственно [38]. Характер профильного распределения

значений  $\delta^{13}\text{C}$  педогенных карбонатов обусловлен диффузионным смешиванием изотопно более тяжелого углерода атмосферного  $\text{CO}_2$  с более легким, происходящим из дыхания корней растений и минерализации органического вещества. На небольших глубинах в почве влияние атмосферного  $\text{CO}_2$  более велико, по мере увеличения глубины данное влияние падает, и на больших глубинах значения  $\delta^{13}\text{C}$  педогенных карбонатов уже являются функцией скорости почвенного дыхания и количественного соотношения  $\text{C}_3$  и  $\text{C}_4$  растений в экосистемах. В регионах с холодными климатическими условиями формирование изотопного состава педогенных карбонатов может идти в условиях подавленной активности почвенной биоты, что приводит к повышению концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе и утяжелению изотопного состава углерода новообразований. Это явление отмечено нами в новообразованиях черноземов Южного Прибайкалья. Оно проявилось в несоответствии изотопного состава углерода педогенных карбонатных натеков и органического вещества почв [40]. Вымораживание почвенных растворов ведет к облегчению изотопного состава кислорода относительно атмосферных осадков [3, 38], что также отмечалось и для кутан в Южном Прибайкалье [40].

При сравнении изотопного состава углерода и кислорода карбонатов в резко континентальных областях Сибири обнаруживаются довольно близкие значения. Так, в черноземах Южного Прибайкалья значения  $\delta^{13}\text{C}$  варьируют от  $-5,41$  до  $-2,05\text{‰}$  [40]. В криоаридных почвах Тувы они колеблются от  $-5,2$  до  $-2,7\text{‰}$  [36], а в кутанах криоаридных почв Северо-Востока Сибири составляют в среднем  $-2,3\text{‰}$  [34]. И хотя часто такие высокие значения интерпретируются как влияние литогенных карбонатов, схожесть значений в столь отдаленных регионах скорее наводит на мысль о доминирующем влиянии климата в формировании изотопного состава углерода педогенных карбонатов Сибири. Его влияние проявляется в коротком периоде биологической активности почв и, как следствие, в большом влиянии атмосферного  $\text{CO}_2$  на изотопный состав карбонатов, откуда и происходят высокие значения  $\delta^{13}\text{C}$ . Подобное явление наблюдалось и в других холодных областях [3, 8]. В то же время в условиях Средиземноморья значения  $\delta^{13}\text{C}$  в карбонатах облегчаются до  $-10\text{‰}$  [5].

Изотопный состав кислорода карбонатных новообразований варьирует в широких пределах от  $-7,8\text{‰}$  в почвах Тувы [36] до  $-17,4\text{‰}$  в почвах Северо-Востока Сибири [34]. В черноземах Южного Прибайкалья они находятся в пределах от  $-10,15$  до  $-16,33\text{‰}$  [40].

### **Основные формы педогенных карбонатных новообразований в почвах Байкальского региона и их значение для палеореконструкций**

*Ризолиты* (рис. 2) формируются из растворов, насыщенных  $\text{Ca}^{2+}$ , перемещающихся по направлению к корням, и последующего осаждения кальцита

вдоль корня. Поскольку корни растений поглощают  $\text{Ca}^{2+}$  значительно хуже, чем воду, ионы  $\text{Ca}^{2+}$  соединяются с  $\text{CO}_2$ , выделяемым корнями в ходе дыхания, и осаждаются в виде  $\text{CaCO}_3$ , формируя таким образом ризолиты [41].



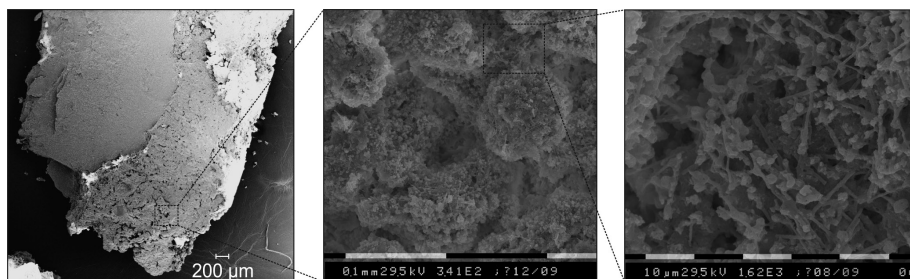
**Рис. 2.** Ризолиты в дюнных песках долины р. Белой (разрез Холмушино (52°51' с.ш., 103°20' в.д., абс. выс. 428 м)). Фото В.А. Голубцова  
**[Fig. 2.** Rhizoliths formed in dune sands in the Belaya river valley (Kholmushino section, 52°51' N, 103°20' E, absolute height 428 m). Photo by VA Golubtsov]

Формирование ризолитов – довольно распространенное явление для корней кустарников и деревьев, но не характерное для трав из-за их короткого жизненного цикла. По данным [42], углерод карбонатов из вмещающих отложений полностью замещается углеродом  $\text{CO}_2$ , выделяемым корнями во время формирования ризолитов. Эти новообразования формируются относительно быстро (месяцы–годы) и, как правило, не перекристаллизовываются после окончания формирования. Перечисленные факторы обуславливают их высокий потенциал при палеорекострукциях, на что также указано и в [43]. На территории Южного Прибайкалья наиболее выраженные формы таких новообразований обнаружены нами в псаммоземах гумусовых, формирующихся на дюнных песках раннеголоценового возраста в долине р. Белой (см. рис. 2).

*Игольчатый кальцит* (рис. 3) обнаруживается в межагрегатных порах, трещинах усыхания и других пустотах в почвенной массе. Однако он редко полностью заполняет эти пространства [12]. Он может присутствовать и в составе других карбонатных новообразований, что было обнаружено нами в кутанах Южного Прибайкалья (см. рис. 3). Данная форма карбонатных новообразований чаще всего приурочена к переходной по гумусу части по-

чвенного профиля. Здесь он формируется благодаря относительно влажным условиям накопления органического вещества, когда иссушение профиля компенсируется капиллярным подъемом влаги [27].

Происхождение игольчатого кальцита может быть связано с биологическими процессами. Один из них – грибная биоминерализация внутри пучков мицелия. Освобожденные после разложения органического вещества грибных стенок пучки мицелия могут быть заполнены кальцитом с формированием зубчатых пластинок. Второй путь – сапрофитная биоминерализация [1, 27].

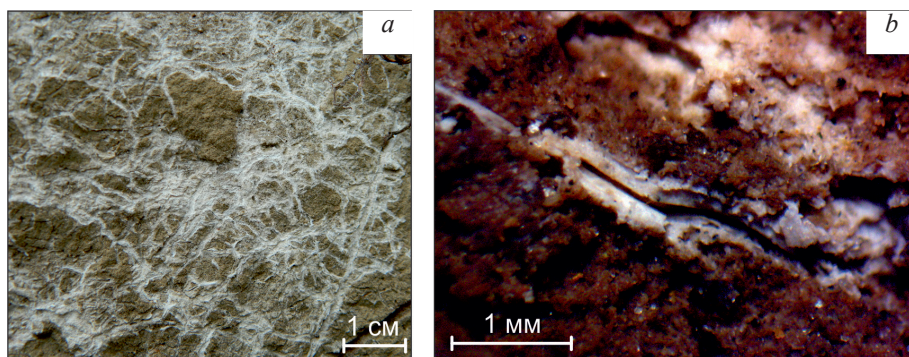


**Рис. 3.** Строение игольчатого кальцита в карбонатных кутанах черноземов Южного Прибайкалья. Фото В.А. Голубцова  
[Fig. 3. Structure of needle-fiber calcite in carbonate coatings of chernozems in the Southern Cisbaikalia. Photo by VA Golubtsov]

Биологическое происхождение приписывается монокристаллическим формам. Поликристаллические образуются при быстром испарении растворов [12]. С точки зрения реконструкций условий среды игольчатый кальцит является индикатором достаточного почвенного увлажнения [27].

*Гипокутаны* (рис. 4) формируются из растворов, просачивающихся через почвенную массу, в результате быстрого осаждения  $\text{CaCO}_3$  вокруг больших и средних пор. Быстрое осаждение происходит из-за значительно большего снижения парциального давления  $\text{CO}_2$  в крупных порах по сравнению с микропорами. Из-за быстрого осаждения эти формы карбонатных новообразований имеют малый возраст и формируются в течение недель – месяцев [27]. Гипокутаны могут также формироваться из-за колебаний уровня грунтовых вод в почвенном профиле [11]. Еще одна гипотеза объясняет их формирование деятельностью корневой системы растений – быстрое поглощение влаги корнями обуславливает интенсивную кристаллизацию карбонатов из растворов [12]. Эта гипотеза объясняет форму данных аккумуляций, которые часто образуют как бы чехол вокруг отмерших корней. В отличие от ризолитов, гипокутаны более характерны для корневых систем травянистых растений. Гипокутаны – это скопления карбонатных минералов вокруг корней, в то время как ризолиты рассматриваются и как внутрикорневые структуры цементации [12].





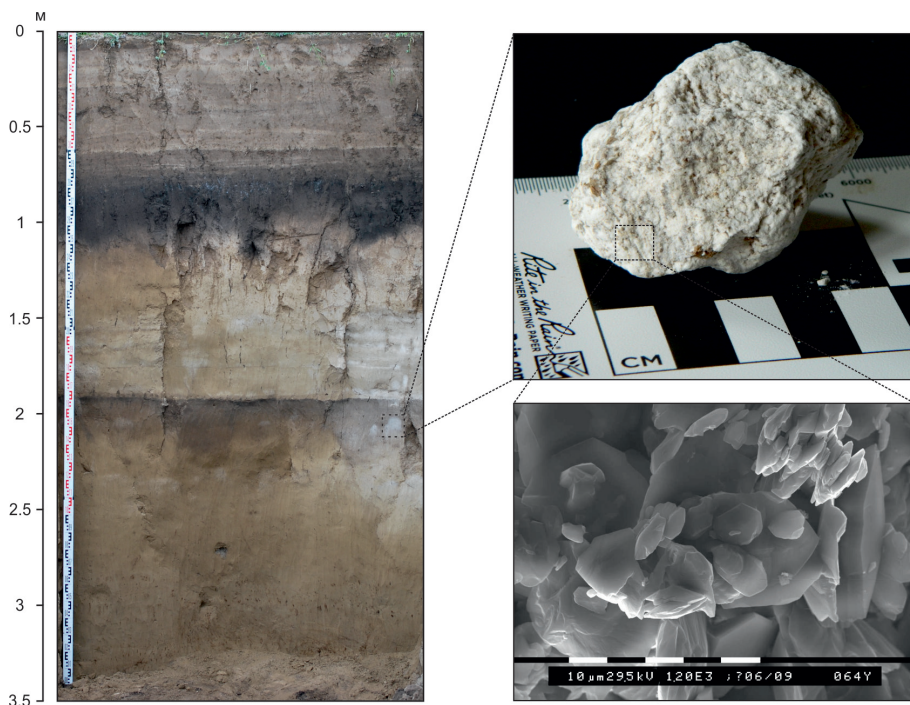
**Рис. 4.** Морфология гипокутан в лессовидных почвообразующих породах Байкальского региона: *a* – распределение новообразований во вмещающих отложениях; *b* – мезоморфология гипокутан (в центре). Фото В.А. Голубцова  
 [Fig. 4. Morphology of hypocoatings in loess-like parent material of the Baikal region: *a* - Distribution of accumulations in sediments; *b* - Mesomorphology of hypocoatings. Photo by VA Golubtsov]

С.В. Овечкин [25] выделяет несколько разновидностей гипокутан: 1) слабосцементированные, состоящие из мелкозернистого кальцита, который формируется при медленной кристаллизации из растворов невысокой концентрации, полностью заполняющих крупные поры; 2) инкрустации по стенкам пор плотной однородной массой преимущественно микрозернистого кальцита. Образуются при полном заполнении пор растворами высокой концентрации, при более высокой скорости кристаллизации; 3) столбики – плотные сплошные заполнения микрозернистым кальцитом пор и корневых каналов, образующиеся при интенсивном испарении пленочной влаги.

Гипокутаны широко распространены в лессовидных отложениях Прибайкалья и Забайкалья. Они обнаруживались нами в профилях разновозрастных (позднеплейстоценовых, голоценовых) почв, сформированных на таких отложениях (см. рис. 4). По мнению многих исследователей, они диагностируют сухие условия среды и сопоставимы по возрасту с вмещающими их отложениями [12, 27].

*Белоглазка* (рис. 5) – объемные мучнистые скопления карбонатов округлой, неправильной, слегка вытянутой или угловатой формы. Может резко отграничиваться от вмещающей почвенной массы или постепенно переходить в нее через пропитку.

В работе [24] описаны формы белоглазки с мелкими округлыми плотными ядрами (1–3 мм), а также с одиночным относительно крупным ядром (3–5 мм диаметром), находящимся среди мучнистой карбонатной массы. Образование таких разновидностей связывалось авторами с чередованием автоморфно-гидроморфных циклов почвообразования. Подобные разновидности белоглазки считаются переходной формой к журавчикам. Согласно исследованиям [24] белоглазка может образовываться несколькими путями:



**Рис. 5.** Строение белоглазки, сформированной в профиле чернозема (разрез Большой Куналей (51°25' с.ш., 107°34' в.д., абс. выс. 735 м). Фото В.А. Голубцова)  
 [Fig. 5. Structure of “white-eye” formed in chernozem (Bol'shoi Kunaley section, 51°25'N, 107°34'E, absolute height 735 m). Photo by VA Golubtsov]

1) инкреционным (постепенная концентрация в почвенной массе микрозернистого кальцита вокруг пор и пустот в результате испарения в них почвенных растворов). Микрозоны повышенной концентрации криптомикрозернистого кальцита среди минеральной массы (пропитки) являются зародышами белоглазки [20]. Таким путем формируется палево-желтая белоглазка с нечеткими границами и низким содержанием  $\text{CaCO}_3$  (25–35%), что обусловлено значительной примесью кластического и глинистого материала;

2) аккреционным (испарение пленочной влаги из пор, а также в пустотах на стыках структурных отдельностей); так формируется белоглазка, четко отграниченная от вмещающей породы, содержащая минимальное количество кластических зерен и, как следствие, наибольшую (выше 60%) долю  $\text{CaCO}_3$ . Как правило, такая разновидность новообразования имеет чисто белую окраску.

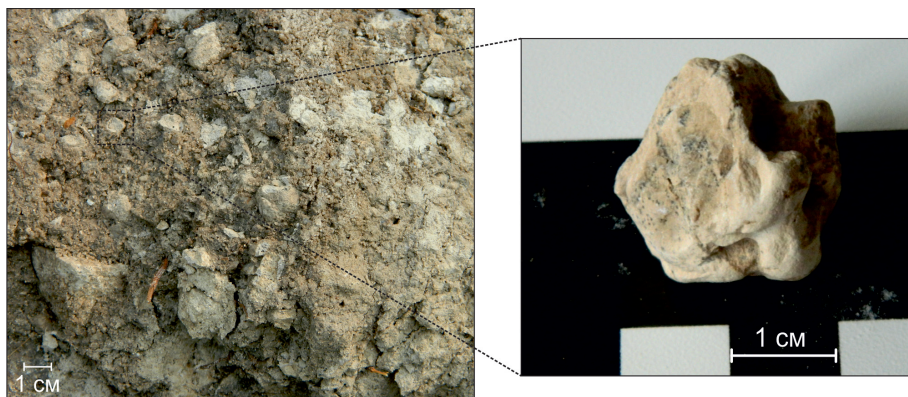
В отложениях легкого механического состава белоглазка не обнаруживается. В то же время она является довольно типичным представителем карбонатного профиля черноземов, развивающихся в Байкальском регионе

на лессовидных отложениях (см. рис. 5). Так, в разрезе Большой Куналей (Селенгинское среднегорье) белоглазки имеют довольно крупные размеры (8–10 см), четкие границы с вмещающей почвенной массой. Субмикроскопические исследования показали, что аккумуляции сложены преимущественно микроспаритовыми (4–50 мкм) табличчатыми кристаллами кальцита с ровными поверхностями и хорошо выраженными гранями (см. рис. 5). Подобные размеры и форма кристаллов могут указывать на их быструю кристаллизацию из насыщенных растворов. Такой характер кристаллизации свойствен для относительно сухого климата [2], что согласуется с выводами об условиях формирования почв [44].

*Нодули* (рис. 6) представляют собой твердые стяжения округлой или вытянутой формы, легко отделяющиеся от вмещающей почвенной массы. Нодули различны по форме и размерам. Их облик варьирует от мелких округлых (кальцитовые ооиды) до широких плоских образований [45]. В основном они гомогенны и мономинеральны, но иногда могут встречаться полиминеральные образования, демонстрирующие концентрическую зональность. Такие образования относятся к конкрециям. Как правило, они имеют округлую или эллиптическую форму [45]. В отличие от гипокутан, ризолитов и других педогенных карбонатных новообразований формирование нодулей не привязано к естественным поверхностям и пустотам почвенной матрицы, а происходит в результате постепенной цементации кальцитом вмещающих отложений. Рост нодулей начинается на каком-либо ядре (минеральные частицы, органические остатки и пр.), служащем в качестве затравки [11, 12]. Механизмы формирования нодулей остаются до конца невыясненными и во многом дискуссионными. Указывается на роль процессов метасоматоза в формировании этих новообразований [20].

Высказаны гипотезы о происхождении нодулей из коллоидных растворов, что аргументируется большим количеством элементов-примесей, трещин усыхания, скрытокристаллической структурой [46]. Карбонатные нодули в почвенном профиле часто рассматриваются как аллохтонный материал, на что указывают их резкие границы и отличное от вмещающей почвенной матрицы внутреннее строение и состав [2]. В целом нодули формируются в ходе перераспределения карбонатов *in situ*, без их существенной миграции по профилю [13], однако некоторые авторы рассматривают их формирование как результат процессов выщелачивания [12]. С этой точки зрения нодули могут служить индикатором интенсивности и направленности процессов выщелачивания. Но расшифровка этой информации затруднительна, так как нодули формируются в течение длительного времени (десятки–сотни лет) [13] и всегда отражают многофазную историю развития карбонатного профиля почв [1], а их морфология зачастую не позволяет выделить стадии развития.

В Южном Прибайкалье такие новообразования обнаруживались нами в нижних горизонтах черноземов, формирующихся на лессовидных отложениях террас левых притоков р. Ангара, а также в бассейне р. Куды (см. рис. 6).

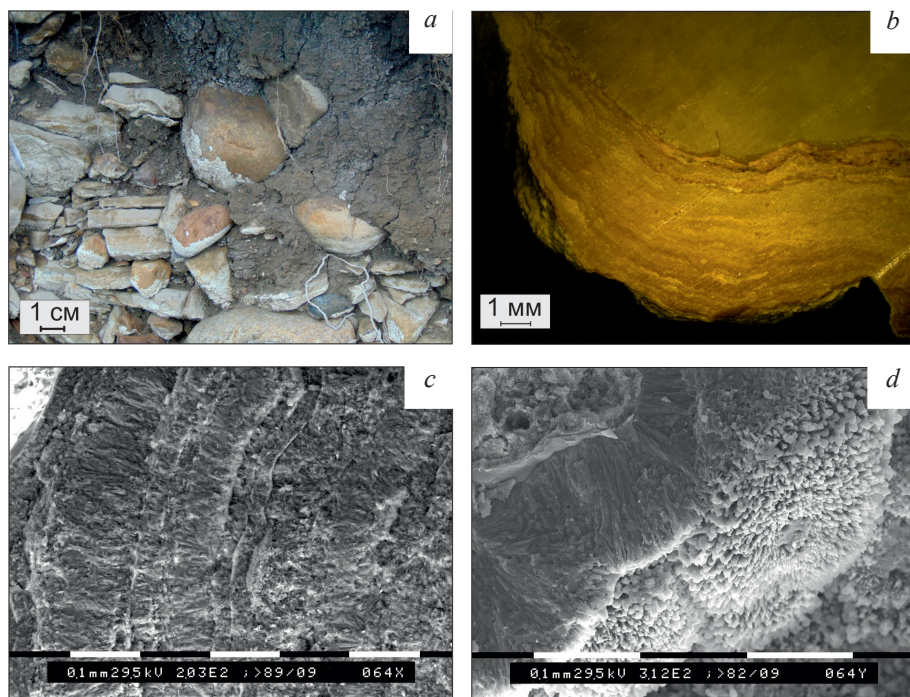


**Рис. 6.** Строение нодулей. Слева – положение новообразований в нижних горизонтах чернозема в долине р. Куды (Южное Прибайкалье), справа – общий вид новообразования. Фото В.А. Голубцов  
**[Fig. 6.** Structure of nodules. Left - Nodules at lower depth of chernozems in the Kuda river valley (Southern Cisbaikalia), right - Morphology of nodule. Photo by VA Golubtsov]

*Кутаны* (рис. 7), как правило, представляют собой слоистые отложения карбонатного материала на поверхности различных включений в почвенном профиле [8, 40, 47]. Карбонатные кутаны широко распространены в почвах аридных и семиаридных областей. В почвах, развивающихся на известняках и других карбонатных породах, они могут формироваться и в условиях гумидного климата [47]. Присутствие карбонатных кутан в почвах и отложениях зафиксировано в различных частях земного шара, включающих высокие широты Арктики [8], умеренные области Атлантики [48], Средиземноморье [5], различные климатические зоны США [33], а также холодные резко континентальные области Сибири [34, 36, 40].

Кутаны состоят из последовательно расположенных слоев карбонатного материала, которые, в свою очередь, могут быть стратифицированы на микрослои [8, 47], различимые на мезо- и микроморфологическом уровнях [36] (см. рис. 7). Подобное строение кутан обусловлено характером аккумуляции материала этих новообразований – они формируются в результате последовательной кристаллизации карбонатов из тонких пленок влаги, остающихся на нижних поверхностях грубообломочных и гравийно-галечниковых включений [8, 11]. Однако в отношении их генезиса не все столь однозначно. Так, в работе [48] изучен генезис карбонатных кутан, формирующихся в семиаридных и умеренных климатических условиях. Показано, что генезис налетов определяется характером перехода кристаллов кальцита, слагающего кутаны, из одной формы кристаллизации в другую в процессе роста. Первая представлена беспорядочно ориентированным монокристаллическим кальцитом игольчатой формы. Следующая кристаллическая форма – гетерогенные поликристаллические иглы большого размера (50  $\mu\text{m}$ ). Заключительная фаза кристаллизации представлена ромбоэдрическим спаритом. Описанный

последовательный переход сопровождается изменениями химического состава, в частности, содержания Mg [48].



**Рис. 7.** Строение карбонатных кутан в почвах Южного Прибайкалья: *a* – положение новообразований в профиле, *b* – мезоморфология кутан, *c* – микрослои кутан, по резким контактам сменяющие друг друга, *d* – радиально-ориентированные шестоватые кристаллы кальцита, слагающие один из микрослоев. Фото В.А. Голубцова  
 [Fig. 7. Structure of carbonate coatings in soils of the Southern Cisbaikalia:  
*a* - Position of carbonate accumulations in soil profile, *b* - Mesomorphology of coatings,  
*c* - Microlaminae of coatings, replacing each other by sharp boundaries, *d* - Radial-oriented bladed calcite crystals composing one of microlamina. Photo by VA Golubtsov]

Как правило, внутренний слой кутан – наиболее древний, а внешний слой – молодой. Тем не менее даже в этом случае возможны исключения – пустоты, иногда имеющие место на контакте включения и натека, могут служить местом для кристаллизации нового карбонатного материала и формирования здесь наиболее молодого слоя [49].

Важным фактором, обуславливающим слоистое строение кутан, считаются вариации размеров и морфологии кристаллов, слагающих различные слои [33, 35]. Наличие микрослоев коричневых, серых и других оттенков связывают с присутствием в карбонатном материале кутан примесей органического вещества и железа [36, 47]. Новообразования имеют конусообразную или округлую форму и формируются на нижней стороне включений [11].

Однако в некоторых случаях они покрывают и его верхнюю часть, что может быть связано со спецификой климатических условий [47].

Карбонатные кутаны наиболее репрезентативны для палеопочвенных исследований. На данный момент перспективным подходом для реконструкции палеоэкологических условий является измерение соотношений стабильных изотопов углерода и кислорода в слоях натеков [5, 40]. Морфология и вещественный состав педогенных карбонатных кутан неоднократно использовались для реконструкции климатических и почвообразовательных условий [8, 33–36, 40]. Отмечено большое влияние иссушения на скорость роста кристаллов кальцита, слагающих кутаны [33]. На основании изучения натеков, находившихся в различных гидротермических условиях, авторы [33] предположили, что формирование кристаллов кальцита, слагающих новообразования, может быть обусловлено климатическими факторами. Изометричные и параллельно-ориентированные призматические кристаллы слагали кутаны, формировавшиеся в сухих условиях. В то же время в относительно влажных условиях наблюдались беспорядочно ориентированные волокнистые и остросереберные кристаллы. Специфическая морфология кристаллов кальцита наблюдалась в кутанах криогенного происхождения. Формирование в таких новообразованиях игольчатого кальцита иногда объясняют псевдоморфозами по кристаллам льда [50]. Некоторые слои кутан, изученных нами в Южном Прибайкалье, сложены радиально-волокнистыми сферолитами, что в сочетании с изотопными данными позволило нам сделать вывод об активном участии процессов промерзания почвенной толщи в формировании новообразований [40]. В целом предполагается, что светлые микрослои, сложенные чистыми, хорошо сформированными и параллельно-ориентированными кристаллами кальцита, отражают более сухие климатические условия, которые были менее благоприятны для биологической активности. Высокое содержание примесей, хуже сформированные и произвольно ориентированные кристаллы кальцита указывают на более влажные периоды [47].

Датирование слоев педогенных карбонатных кутан успешно проводилось различными методами, среди которых  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  [10] и радиоуглеродный [5, 7, 36], а также термолюминесцентный [9]. Однако на данный момент наиболее представительные результаты получены именно с помощью радиоуглеродного метода. Радиоуглеродный возраст наиболее древних слоев карбонатных кутан, как правило, демонстрирует хорошую корреляцию с возрастом культурных слоев, почв и отложений, в которых они формируются. Отмечается, что радиоуглеродный возраст наиболее древних слоев карбонатных кутан может указывать на минимальный возраст почв и отложений, в которых сформированы новообразования [5].

Формирование большинства карбонатных кутан происходило в голоцене, и лишь в некоторых случаях получены даты, соответствующие концу позднего плейстоцена. Как правило, радиоуглеродный возраст педогенных

карбонатных кутан возрастает с увеличением глубины их залегания [5]. Измерение возраста слоев кутан позволило оценить скорости их аккумуляции [5], которые зависят от многих факторов внешней среды и, таким образом, могут служить дополнительным инструментом для реконструкции динамики локальных экологических условий. Продолжительность образования карбонатных кутан толщиной 0,5–4 мм составила от 500 до 10 000 лет, а рассчитанная скорость роста изменялась в диапазоне от 0,17 до 10 мм за 1 000 лет. Наиболее быстрый рост был отмечен в семигумидных и гумидных условиях [51].



**Рис. 8.** Лессовые куколки в нижней части профиля современной почвы (Усть-Менза-15, Забайкальский край). Фото В.А. Голубцова  
**Fig. 8.** Loess dolls in lower part of modern soil profile (Ust-Menza-15, Zabaikalsky Krai). Photo by VA Golubtsov

В Прибайкалье карбонатные кутаны были изучены нами в черноземах, сформированных в пределах террас р. Белой [35, 40] (см. рис. 7). Многие из них отчетливо разделены на микрослои, состоящие из радиально ориентированных шестоватых кристаллов кальцита (см. рис. 7). Возникновение подобной структуры интерпретируется нами как результат перерыва в их росте, в результате чего на внешней поверхности остается множество мелких зерен кристаллов. Последующее возобновление роста провоцирует конкуренцию между такими произвольно ориентированными зародышами, что в конечном итоге выражается в формировании своеобразной радиально-шестоватой структуры. В результате довольно частых перерывов в росте и формируются многочисленные микрослои, по резким контактам сменяющие друг друга (см. рис. 7).

*Лессовые куколки* формируются в трещинах и пустотах (макропоры, ходы корней и почвенных животных). Такие участки отличаются наибольшей аэрацией, что значительно снижает парциальное давление  $\text{CO}_2$  в растворах и

ведет к осаждению карбонатов [12]. Несмотря на их название, наиболее выраженные формы таких карбонатных новообразований в Байкальском регионе были обнаружены нами в супесчаных отложениях археологического памятника Усть-Менза-15 (Забайкальский край) (рис. 8).

Здесь они приурочены к ходам крупных роющих животных в нижней части профиля современных лесных почв. Их формирование способствовало сохранению этих ходов в целостности и позволило предположить наличие этапа остепнения во время формирования почв.

### **Выводы**

1. В почвах Байкальского региона отмечается значительное разнообразие карбонатных новообразований, среди которых наиболее часто встречаются игольчатый кальцит, ризолиты, гипокутаны, белоглазки, нодулы, кутаны. Все они могут успешно применяться для реконструкции условий почвообразования, однако наиболее информативными являются карбонатные кутаны.

2. Отмечается специфика в морфологии и изотопном составе карбонатных новообразований почв Байкальского региона, связанная, по-видимому, с резко континентальными климатическими условиями и активным участием процессов сезонного промерзания-протаивания почв в формировании новообразований.

3. Вещественный состав рассматриваемых новообразований в целом сходен с таковым для других резко континентальных областей юга и северо-востока Сибири. Преобладает карбонат кальция, но его содержание значительно варьирует как в различных формах карбонатных аккумуляций, так и в пределах одного новообразования. Это обусловлено примесями силикатного глинистого материала, кремнезема, кварца, полуторных оксидов и гумуса.

4. Различия в вещественном и изотопном составе служат одними из наиболее информативных индикаторов для реконструкции процессов почвообразования и отклика почв на климатические изменения.

### **Литература**

1. Хохлова О.С. Педогенные карбонаты как носители памяти об условиях почвообразования (на примере степной зоны Русской равнины) // *Память почв : почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий*. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. С. 406–437.
2. Kovda I.V., Wilding L.P., Drees L.R. Micromorphology, submicroscopy and microprobe study of carbonate pedofeatures in a Vertisol gilgai soil complex, South Russia // *Catena*. 2003. Vol. 54. PP. 457–476.
3. Cerling T. The stable isotopic composition of soil carbonate and its relationship to climate // *Earth and Planetary Science Letters*. 1984. Vol. 71. PP. 229–240.
4. Dworkin S.I., Nordt L., Atchley S. Determining terrestrial paleotemperatures using the oxygen isotopic composition of pedogenic carbonate // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. Vol. 237. PP. 56–68.



5. Pustovoytov K., Schmidt K., Taubald H. Evidence for Holocene environmental changes in the northern Fertile Crescent provided by pedogenic carbonate coatings // *Quaternary Research*. 2007. Vol. 67. PP. 315–327.
6. Quade J., Garziona C., Eiler J. Paleoelevation reconstruction using pedogenic carbonates // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2007. Vol. 66. PP. 53–88.
7. Хохлова О.С., Хохлов А.А., Чичагова О.А., Моргунова Н.Л. Радиоуглеродное датирование карбонатных аккумуляций в почвах голоценового хроноряда степного Приуралья // *Почвоведение*. 2004. № 10. С. 1163–1178.
8. Courty M.-A., Marlin C., Dever L., Tremblay P., Vachier P. The properties, genesis and environmental significance of calcitic pendants from the High Arctic (Spitsbergen) // *Geoderma*. 1994. Vol. 61. PP. 71–102.
9. Singhvi A., Banerjee D., Ramesh R., Rajaguru S., Gogte V. A luminescence method for dating “dirty” pedogenic carbonates for paleoenvironmental reconstruction // *Earth and Planetary Science Letters*. 1996. Vol. 139. PP. 321–332.
10. Sharp W., Ludwig K., Chadwick O., Amundson R., Glaser L. Dating fluvial terraces by  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  on pedogenic carbonate, Wind River Basin, Wyoming // *Quaternary Research*. 2003. Vol. 59. PP. 139–150.
11. Durand N., Monger H.C., Canti M.G. Calcium carbonate features / Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Amsterdam : Elsevier, 2010. PP. 149–194.
12. Barta G. Secondary carbonates in loess-paleosol sequences : a general review // *Central European Journal of Geosciences*. 2011. Vol. 3(2). PP. 129–146.
13. Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates : Forms and formation processes // *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 157. PP. 1–17.
14. Doner H.E., Lynn W.C. Carbonate, halide, sulfate, and sulfide minerals / Minerals in soil Environments. Madison, Wisconsin : Soil Science Society of America, 1989. PP. 279–330.
15. Ковда В.А. К вопросу об образовании в почвах вторичных карбонатов кальция // *Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева*. Л. : Изд-во АН СССР, 1934. Т. 9. С. 247–253.
16. Розанов А.Б. Карбонатизация // *Элементарные почвообразовательные процессы : опыт концептуального анализа, характеристика, систематика*. М. : Наука, 1992. С. 23–25.
17. Goudie A.S. Calcrete / *Chemical Sediments and Geomorphology*. London : Academic Press, 1983. PP. 93–131.
18. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск : Ойкумена, 2002. 288 с.
19. Catoni M., Falsone G., Bonifacio E. Assessing the origin of carbonates in a complex soil with a suite of analytical methods // *Geoderma*. 2012. Vol. 175–176. PP. 47–57.
20. Поляков А.Н. Микроморфологическое исследование кальцита в черноземах Европейской части СССР // *Почвоведение*. 1989. № 2. С. 79–86.
21. Рысков Я.Г., Мергель С.В., Ковда И.В., Моргун Е.Г. Стабильные изотопы углерода и кислорода как индикатор условий формирования карбонатов почв // *Почвоведение*. 1995. № 4. С. 405–414.
22. Mack G.H., Cole D.R., Trevino L. The distribution and discrimination of shallow, authigenic carbonate in the Pliocene-Pleistocene Palomas Basin, southern Rio Grande rift // *Geological Society of America Bulletin*. 2000. Vol. 112. PP. 643–656.
23. Verrechia E.P. Pedogenic carbonates / *Encyclopedia of Geobiology*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, 2011. PP. 721–725.
24. Лебедева И.И., Овечкин С.В. Карбонатные новообразования в черноземах левобережной Украины // *Почвоведение*. 1975. № 11. С. 14–31.
25. Овечкин С.В. Генезис и минералогический состав карбонатных новообразований черноземов левобережной Украины и Заволжья // *Почвы и почвенный покров лесной и степной зон СССР и их рациональное использование*. М., 1984. С. 185–195.

26. Goudie A.S. Review : organic agency in calcrete development // *Journal of Arid Environments*. 1996. Vol. 32. PP. 103–110.
27. Becze-Deak J., Langohr R., Verrecchia E.P. Small scale secondary CaCO<sub>3</sub> accumulations in selected sections of the European loess belt. Morphological forms and potential for paleoenvironmental reconstruction // *Geoderma*. 1997. Vol. 76. PP. 221–252.
28. Machette M. Calcic soils of the American Southwest / *Soils and Quaternary Geology of the Southwestern United States*. Geological Society of America Special Paper, 1985. Vol. 203. PP. 1–21.
29. Schaetzl R.J., Anderson S. *Soils : genesis and geomorphology*. New York : Cambridge University Press, 2005. 817 pp.
30. Ludvigson G.A., Gonzalez L.A., Metzger R.A., Witzke B.J., Brenner R.L., Murillo A.P., White T.S. Meteoric sphaerosiderite lines and their use for paleohydrology and paleoclimatology // *Geology*. 1998. Vol. 26. PP. 1039–1042.
31. Kohut C., Muehlenbachs K., Dudas M.J. Authigenic dolomite in a saline soil in Alberta, Canada // *Soil Science Society of America Journal*. 1994. Vol. 59. PP. 1499–1504.
32. Whipkey C.E., Capo R.C., Hsieh J.C.C., Chadwick O.A. Development of magnesian carbonates in Quaternary soils on the Island of Hawaii // *Journal of Sedimentary Research*. 2002. Vol. 72. PP. 138–165.
33. Chadwick O., Sowers J., Amundson R. Morphology of calcite crystals in clast coatings from four soils in the Mojave Desert region // *Soil Science Society of America Journal*. 1989. Vol. 52. PP. 211–219.
34. Pustovoytov K.E. Pedogenic carbonate cutans as a record of the Holocene history of relic tundra-steppes of the Upper Kolyma Valley (North-Eastern Asia) // *Catena*. 1998. Vol. 34. PP. 185–195.
35. Голубцов В.А., Черкашина А.А. Генезис карбонатных натеков в четвертичных отложениях Южного Прибайкалья // *География и природные ресурсы*. 2014. № 2. С. 62–70.
36. Бронникова М.А., Конопляникова Ю.В., Агапова А.Р., Зазовская Э.П., Лебедева М.П., Турова И.В., Непоп Р.К., Шоркунов И.Г., Черкинский А.Е. Кутаны криоаридных почв и другие летописи ландшафтно-климатических изменений в котловине озера Ак-Холь (Тува) // *Почвоведение*. 2017. № 2. С. 158–175.
37. Karberg N.J., Pregitzer K.S., King J.S., Friend A.L., Wood J.R. Soil carbon dioxide partial pressure and dissolved inorganic carbonate chemistry under elevated carbon dioxide and ozone // *Oecologia*. 2005. Vol. 142. PP. 296–306.
38. Cerling T.E., Quade J. Stable carbon and oxygen isotopes in soil carbonates / *Climate change in continental isotopic records* // *Geophysical monograph*. 1993. Vol. 78. PP. 217–231.
39. Amundson R., Chadwick O., Sowers J., Doner H. The stable isotope chemistry of pedogenic carbonates at Kyle Canyon, Nevada // *Soil Science Society of America Journal*. 1989. Vol. 53. PP. 201–210.
40. Голубцов В.А., Черкашина А.А., Пустовойтов К.Е., Штар К. Стабильные изотопы углерода и кислорода педогенных карбонатных кутан в черноземах Южного Прибайкалья как индикаторы локальных экологических изменений // *Почвоведение*. 2014. № 10. С. 1215–1227.
41. Lambers H., Mougél C., Jaillard B., Hinsinger P. Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective // *Plant Soil*. 2009. Vol. 321. PP. 83–115.
42. Gocke M., Pustovoytov K., Kühn P., Wiesenberg G.L.B., Löscher M., Kuzyakov Y. Carbonate rhizoliths in loess and their implications for paleoenvironmental reconstruction revealed by isotopic composition:  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  // *Chemical Geology*. 2011. Vol. 283. PP. 251–260.
43. Kraus M.J., Hasiotis S.T. Significance of different modes of rhizolith preservation to interpreting paleoenvironmental and paleohydrologic settings: examples from paleogene paleosols, Bighorn basin, Wyoming, USA // *Journal of Sedimentary Research*. 2006. Vol. 76. PP. 633–646.

44. Рыжов Ю.В., Голубцов В.А., Кобылкин Д.В., Черных В.Н. Основные периоды почвообразования и осадконакопления в лесостепных ландшафтах Селенгинского среднегорья в позднеледниковье и голоцене // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 114–125.
45. Sellés-Martínez J. Concretion morphology, classification and genesis // Earth-Science Reviews. 1996. Vol. 41. PP. 177–210.
46. Добровольский В.В. Карбонатные стяжения в почвах и почвообразующих породах Центрально-черноземной области // Почвоведение. 1956. № 5. С.31–42
47. Pustovoytov K. Pedogenic carbonate cutans on clasts in soils as a record of history of grassland ecosystems // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2002. Vol. 177. PP. 199–214.
48. Ducloux J., Laouina A. The pendent calcretes in semi-arid climates: an example located near Taforalt, NW Morocco // Catena. 1989. Vol. 16. PP. 237–249.
49. Brock A.L., Buck B.J. A new formation process for calcic pendants from Pahrangat Valley, Nevada, USA, and implication for dating Quaternary landforms // Quaternary Research. 2005. Vol. 63, PP. 359–367.
50. Vogt T. Cryogenic physicochemical precipitations: iron, silica, calcium carbonate // Permafrost Periglacial Process. 1991. Vol. 1. PP. 283–293.
51. Pustovoytov K. Growth rates of pedogenic carbonate coatings on coarse clasts // Quaternary International. 2003. Vol. 106-107. PP. 131–140.

*Поступила в редакцию 27.04.2017 г.; повторно 20.05.2017 г.;  
принята 26.06.2017 г.; опубликована 22.09.2017 г.*

**Голубцов Виктор Александрович** – канд. геогр. наук, н.с. лаборатории геоморфологии Института географии им. В.Б. Сочава СО РАН (Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1).  
E-mail: [tea\\_88@inbox.ru](mailto:tea_88@inbox.ru)

**For citation:** Golubtsov VA. Secondary carbonate accumulations in soils of the Baikal region: formation processes and significance for paleosol investigations. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2017;39:6-28. doi: 10.17223/19988591/39/1 In Russian, English Summary

**Viktor A. Golubtsov**

*VB Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

### **Secondary carbonate accumulations in soils of the Baikal region: formation processes and significance for paleosol investigations**

Secondary carbonate accumulations are one of the most important genetic, material and classification components of soils, formed in a wide range of natural conditions. The processes of their formation are closely related to the genesis of soils and their evolution. The study of their morphology and material and isotopic composition is of considerable value for knowledge of the regularities of soils and landscape evolution. However, now, questions concerning the diversity, specificity of the formation and structure of carbonate accumulations in sharply continental regions of southern Siberia remain practically untouched. In this research, we summarize the data on the diversity, composition, factors and mechanisms of formation of pedogenic carbonates formed over the last years and we supplement them with materials of our own research in the territory of the Baikal region.

We identified the main sources of carbonates in soils, divided into the following groups: 1) formation of carbonates directly in the soil during weathering of parent rocks; 2) their supply from outside as a result of movement of weathering products of carbonate rocks by various geological agents. We evaluated the variety of genetic forms of carbonates in soils, among which the main ones are lithogenic, hydrogenic and pedogenic. We identified the main factors of carbonate accumulation in the soil profile, which include concentration of soil solutions, temperature, partial pressure of CO<sub>2</sub>, moisture and the character of the soil profile desiccation. These factors are determined by the features of the hydrothermal and gas regimes of soils, as well as by the biota activity. We present data on mineralogical, chemical and isotope composition of pedogenic carbonates of soils formed under different climatic conditions, in particular, in the Baikal region. There is a significant similarity in the material and stable carbon and oxygen isotope composition of the accumulation of secondary carbonates in sharply continental regions of Siberia. We evaluated the mechanisms of formation of various types of pedogenic carbonate accumulations. On the basis of our own research, we present data on the diversity of carbonate accumulations in soils of the Baikal region, their material composition and their role in paleosol research. Rhizolites, needle-fiber calcite, hypocoatings, white eyes, nodules, coatings, loess dolls are described in detail and data on their morphology at different levels of structural organization are given (see Figures).

*The article contains 8 Figures, 51 References.*

**Keywords:** carbonates; secondary carbonate accumulations; stable isotopes; soils; paleoreconstructions.

**Funding:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No 17-04-00092).

### References

1. Khokhlova OS. Pedogennye karbonaty kak nositeli pamyati obusloviyakh pochvoobrazovaniya (na primere stepnoy zony Russkoy ravniny) [Pedogenic carbonates as a carrier of memory of soil-forming factors (Case study in steppe areas of the Russian plain)]. In: *Soil memory: Soil as a Memory of Biosphere-Geosphere-Anthroposphere interactions*. Targulian VO and Goryachkin SV, editors. Moscow: LKI Publ.; 2008. pp. 406-437. In Russian
2. Kovda IV, Wilding LP, Drees LR. Micromorphology, submicroscopy and microprobe study of carbonate pedofeatures in a Vertisol gilgai soil complex, South Russia. *Catena*. 2003;54:457-476. doi: [10.1016/S0341-8162\(03\)00121-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00121-8)
3. Cerling T. The stable isotopic composition of soil carbonate and its relationship to climate. *Earth and Planetary Science Letters*. 1984;71:229-240. doi: [10.1016/0012-821X\(84\)90089-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90089-X)
4. Dworkin SI, Nordt L, Atchley S. Determining terrestrial paleotemperatures using the oxygen isotopic composition of pedogenic carbonate. *Earth and Planetary Science Letters*. 2005;237:56-68. doi: [10.1016/j.epsl.2005.06.054](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.054)
5. Pustovoytov K, Schmidt K, Taubald H. Evidence for Holocene environmental changes in the northern Fertile Crescent provided by pedogenic carbonate coatings. *Quaternary Research*. 2007;67:315-327. doi: [10.1016/j.yqres.2007.01.002](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.01.002)
6. Quade J, Garzzone C, Eiler J. Paleoelevation reconstruction using pedogenic carbonates. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2007;66:53-88. doi: [10.2138/rmg.2007.66.3](https://doi.org/10.2138/rmg.2007.66.3)
7. Khokhlova OS, Khokhlov AA, Chichagova OA, Morgunova NL. Radiocarbon dating of calcareous accumulations in soils of the Holocene Chronosequence in the Ural River Valley (Cis-Urals steppe). *Eurasian Soil Science*. 2004;37(10):1024-1038.
8. Courty MA, Marlin C, Dever L, Tremblay P, Vachier P. The properties, genesis and environmental significance of calcitic pendants from the High Arctic (Spitsbergen).

- Geoderma*. 1994;61:71-102. Available at: <http://prodinra.inra.fr/record/112314> (accessed 27.03.2017).
9. Singhvi A, Banerjee D, Ramesh R, Rajaguru S, Gogte V. A luminescence method for dating “dirty” pedogenic carbonates for paleoenvironmental reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters*. 1996;139:321-332.
  10. Sharp W, Ludwig K, Chadwick O, Amundson R, Glaser L. Dating fluvial terraces by <sup>230</sup>Th/U on pedogenic carbonate, Wind River Basin, Wyoming. *Quaternary Research*. 2003;59:139-150. doi: [10.1016/S0033-5894\(03\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0033-5894(03)00003-6)
  11. Durand N, Monger HC, Canti MG. Calcium carbonate features. In: *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Stoops G, Marcelino V and Mees F, editors. Amsterdam: Elsevier Publ.; 2010. pp. 149-194. doi: [10.1016/B978-0-444-53156-8.00009-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53156-8.00009-X)
  12. Barta G. Secondary carbonates in loess-paleosoil sequences: A general review. *Central European Journal of Geosciences*. 2011;3(2):129-146. doi: [10.2478/s13533-011-0013-7](https://doi.org/10.2478/s13533-011-0013-7)
  13. Zamanian K, Pustovoytov K, Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: Forms and formation processes. *Earth-Science Reviews*. 2016;157:1-17. doi: [10.1016/j.earscirev.2016.03.003](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.03.003)
  14. Doner HE, Lynn WC. Carbonate, halide, sulfate, and sulfide minerals. In: *Minerals in soil Environments*. Dixon JB and Weed SB, editors. Madison, Wisconsin: Soil Sci. Soc. Am. Publ.; 1989. pp. 279-330.
  15. Kovda BA. K voprosu ob obrazovanii v pochvakh vtorichnykh karbonatov kal'tsiya [On formation of secondary calcium carbonates in soils]. *Trudy Pochvennogo instituta im. VV Dokuchaeva [Proceedings of VV Dokuchaev Soil Science Institute]*. 1934;9:247-253. In Russian
  16. Rozanov AB. Karbonatizatsiya [Carbonatization]. In: *Elementarnye pochvoobrazovatel'nye protsessy: opyt kontseptual'nogo analiza, kharakteristika, sistematika [Elementary soil-forming processes: experience of conceptual analysis, characterization, and systematics]*. Karavaeva NA and Zonn SV, editors. Moscow: Nauka Publ.; 1992. pp. 23-25. In Russian.
  17. Goudie AS. Calcrete. In: *Chemical Sediments and Geomorphology: precipitates and residua in the near-surface environment*. Goudie AS and Pye K, editors. New York: Academic Press; 1983. pp. 93-131.
  18. Glazovskaya MA. Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovaniy prirodnykh landshaftov [Geochemical basis of typology and methods of investigations of natural landscapes]. Smolensk: Oykumena Publ.; 2002. 288 p. In Russian
  19. Catoni M, Falsone G, Bonifacio E. Assessing the origin of carbonates in a complex soil with a suite of analytical methods. *Geoderma*. 2012;175-176:47-57. doi: [10.1016/j.geoderma.2012.01.022](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.022)
  20. Polyakov AN. Mikromorfologicheskoe issledovanie kal'tsita v chernozemakh Evropeyskoy chasti SSSR [Micromorphological study of calcite in chernozems of the European part of the USSR]. *Pochvovedenie*. 1989;2:79-86. In Russian
  21. Ryskov YaG, Mergel SV, Kovda IV, Morgun EG. Stable carbon and oxygen isotopes as indicators of pedogenic carbonate formation]. *Pochvovedenie*. 1995;4:405-414. In Russian
  22. Mack GH, Cole DR, Trevino L. The distribution and discrimination of shallow, authigenic carbonate in the Pliocene-Pleistocene Palomas Basin, southern Rio Grande rift. *Geological Society of America Bulletin*. 2000;112:643-656. doi: [10.1130/0016-7606\(2000\)112<643:TDADOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<643:TDADOS>2.0.CO;2)
  23. Verrechia EP. Pedogenic carbonates. In: *Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Reitner J and Thiel V, editors. Netherlands: Springer Publ.; 2011. pp. 721-725. doi: [10.1007/978-1-4020-9212-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9212-1)
  24. Lebedeva II, Ovechkin SV. Karbonatnye novoobrazovaniya v chernozemakh levoberezhnoy Ukrainy [Carbonate accumulations in chernozems of the left-bank Ukraine]. *Pochvovedenie*. 1975;11:14-31. In Russian

25. Ovechkin SV. Genesis i mineralogicheskiy sostav karbonatnykh novoobrazovaniy chernozemov levoberezhnoy Ukrainy i Zavolzh'ya [Genesis and mineralogical composition of carbonate accumulations of chernozems in the left-bank Ukraine and the Trans-Volga region]. In: *Pochvy i pochvennyy pokrov lesnoy i stepnoy zon SSSR i ikh ratsional'noe ispol'zovanie* [Soils and soil cover of forest and steppe zones of the USSR and their rational use]. Moscow: Proceedings of VV Dokuchaev Soil Science Institute; 1984. pp. 185-195. In Russian
26. Goudie AS. Review: organic agency in calcrete development. *Journal of Arid Environments*. 1996;32:103-110. doi: [10.1006/jare.1996.0010](https://doi.org/10.1006/jare.1996.0010)
27. Becze-Deak J, Langohr R, Verrecchia EP. Small scale secondary CaCO<sub>3</sub> accumulations in selected sections of the European loess belt. Morphological forms and potential for paleoenvironmental reconstruction. *Geoderma*. 1997;76:221-252. Available at: <https://lib.ugent.be/catalog/pug01:182958> (accessed 27.03.2017).
28. Machette M. Calcic soils of the Southwestern United States. In: *Soils and Quaternary Geology of the Southwestern United States*. Weide DL and Faber ML, editors. Denver, CO: Geological Society of America Publ.; 1985. pp. 1-21.
29. Schaetzl RJ, Anderson S. Soils: Genesis and geomorphology. New York: Cambridge University Press; 2005. 817 p.
30. Ludvigson GA, Gonzalez LA, Metzger RA, Witzke BJ, Brenner RL, Murillo AP, White TS. Meteoric sphaerosiderite lines and their use for paleohydrology and paleoclimatology. *Geology*. 1998;26:1039-1042. doi: [10.1130/0091-7613\(1998\)026<1039:MSLATU>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<1039:MSLATU>2.3.CO;2)
31. Kohut C, Muehlenbachs K, Dudas MJ. Authigenic dolomite in a saline soil in Alberta, Canada. *Soil Science Society of America Journal*. 1994;59:1499-1504. doi: [10.2136/sssaj1995.03615995005900050041x](https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900050041x)
32. Whipkey CE, Capo RC, Hsieh JCC, Chadwick OA. Development of magnesian carbonates in Quaternary soils on the Island of Hawaii. *Journal of Sedimentary Research*. 2002;72(1):138-165. doi: [10.1306/050801720158](https://doi.org/10.1306/050801720158)
33. Chadwick O, Sowers J, Amundson R. Morphology of calcite crystals in clast coatings from four soils in the Mojave Desert region. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1989;52:211-219.
34. Pustovoytov KE. Pedogenic carbonate cutans as a record of the Holocene history of relic tundra-steppes of the Upper Kolyma Valley (North-Eastern Asia). *Catena*. 1998;34:185-195. doi: [10.1016/S0341-8162\(98\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00088-5)
35. Golubtsov VA, Cherkashina AA. The genesis of carbonate coatings in Quaternary deposits of South Cisbaikalia. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2014;2:62-70. In Russian
36. Bronnikova MA, Konopliyanikova YuV, Agatova AR, Zazovskaya EP, Lebedeva MP, Turova IV, Nepop RK, Shorkunov IG, Cherkinsky AE. Coatings in cryoaridic soils and other records of landscape and climate changes in the Ak-Khol Lake Basin (Tyva). *Eurasian Soil Science*. 2017;50(2):142-157. doi: [10.1134/S1064229317020016](https://doi.org/10.1134/S1064229317020016)
37. Karberg NJ, Pregitzer KS, King JS, Friend AL, Wood JR. Soil carbon dioxide partial pressure and dissolved inorganic carbonate chemistry under elevated carbon dioxide and ozone. *Oecologia*. 2005;142:296-306. doi: [10.1007/s00442-004-1665-5](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1665-5)
38. Cerling TE, Quade J. Stable carbon and oxygen isotopes in soil carbonates. In: *Climate change in continental isotopic records*. Swart PK, Lohmann KC, Mckenzie J and Savin S, editors. Wiley Publ.; 1993. pp. 217-231. doi: [10.1029/GM078](https://doi.org/10.1029/GM078)
39. Amundson R, Chadwick O, Sowers J, Doner H. The stable isotope chemistry of pedogenic carbonates at Kyle Canyon, Nevada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1989;53:201-210. doi: [10.2136/sssaj1989.03615995005300010037x](https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300010037x)
40. Golubtsov VA, Cherkashina AA, Pustovoytov KE, Stahr K. Stable carbon and oxygen isotopes in pedogenic carbonate coatings of chernozems in the Southern Cis-Baikalia as

- indicators of local environmental changes. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(10):1015-1026. doi: [10.1134/S1064229314100032](https://doi.org/10.1134/S1064229314100032)
41. Lambers H, Mougél C, Jaillard B, Hinsinger P. Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective. *Plant Soil*. 2009;321:83-115. doi: [10.1007/s11104-009-0042-x](https://doi.org/10.1007/s11104-009-0042-x)
  42. Gocke M, Pustovoytov K, Kühn P, Wiesenberg GLB, Löscher M, Kuzyakov Y. Carbonate rhizoliths in loess and their implications for paleoenvironmental reconstruction revealed by isotopic composition:  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ . *Chemical Geology*. 2011;283:251-260. doi: [10.1016/j.chemgeo.2011.01.022](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.01.022)
  43. Kraus MJ, Hasiotis ST. Significance of different modes of rhizolith preservation to interpreting paleoenvironmental and paleohydrologic settings: examples from paleogene paleosols, Bighorn basin, Wyoming, USA. *Journal of Sedimentary Research*. 2006;76:633-646. doi: [10.2110/jsr.2006.052](https://doi.org/10.2110/jsr.2006.052)
  44. Ryzhov YuV, Golubtsov VA, Kobylkin DV, Chernykh VN. Main Periods of soil formation and sedimentation in forest-steppe landscapes of the Selenga Midland during the Late Glacial and Holocene. *Geography and Natural Resources*. 2015;36(3):278-288. doi: [10.1134/S1875372815030087](https://doi.org/10.1134/S1875372815030087)
  45. Sellés-Martínez J. Concretion morphology, classification and genesis. *Earth-Science Reviews*. 1996;41:177-210. doi: [10.1016/S0012-8252\(96\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(96)00022-0)
  46. Dobrovolskiy VV. Karbonatnye styazheniya v pochvakh i pochvoobrazuyushchikh porodakh Tsentral'no-chernozemnoy oblasti [Carbonate concretions in soils and soil-forming sediments of Central-Chernozem region]. *Pochvovedenie*. 1956;5:31-42. In Russian
  47. Pustovoytov K. Pedogenic carbonate cutans on clasts in soils as a record of history of grassland ecosystems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2002;177:199-214. doi: [10.1016/S0031-0182\(01\)00360-1](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00360-1)
  48. Ducloux J, Laouina A. The pendent calcretes in semi-arid climates: an example located near Taforalt, NW Morocco. *Catena*. 1989;16:237-249. doi: [10.1016/0341-8162\(89\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0341-8162(89)90011-8)
  49. Brock AL, Buck BJ. A new formation process for calcic pendants from Pahrnagat Valley, Nevada, USA, and implication for dating Quaternary landforms. *Quaternary Research*. 2005;63:359-367. doi: [10.1016/j.yqres.2005.01.007](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.01.007)
  50. Vogt T. Cryogenic physicochemical precipitations: Iron, silica, calcium carbonate. *Permafrost Periglacial Process*. 1991;1:283-293. doi: [10.1002/ppp.3430010308](https://doi.org/10.1002/ppp.3430010308)
  51. Pustovoytov K. Growth rates of pedogenic carbonate coatings on coarse clasts. *Quaternary International*. 2003;106-107:131-140. doi: [10.1016/S1040-6182\(02\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00168-4)

*Received 27 April 2017; Revised 20 May 2017;  
Accepted 26 June 2017; Published 22 September 2017*

**Author info:**

**Golubtsov Viktor A**, Cand. Sci. (Geogr.), Researcher, Laboratory of Geomorphology, VB Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Ulan-Batorskaya Str., Irkutsk 664033, Russian Federation.  
E-mail: [tea\\_88@inbox.ru](mailto:tea_88@inbox.ru)