

УДК 631.48

СУПРАГЛЯЦИАЛЬНЫЕ ПОЧВЫ И ПОЧВОПОДОБНЫЕ ТЕЛА: РАЗНООБРАЗИЕ И ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Н. С. Мергелов, С. В. Горячкин, Э. П. Зазовская, А. В. Долгих

*Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29,
119017, г. Москва, РФ, mergelov@igras.ru*

В последние десятилетия ледники рассматривают в качестве отдельного биома. Супрагляциальные (наледниковые) органоминеральные образования обладают наиболее разнообразным составом и самой высокой скоростью биологического круговорота среди всех компонентов ледникового биома. В докладе систематизированы результаты последних исследований органоминеральных образований на ледниках, их генезиса, разнообразия и биосферной роли. Ставится вопрос о возможности вовлечения таких образований в круг объектов почвоведения. Рассматривается супрагляциальная зона как область формирования почвенных и почвоподобных тел, биогеохимические процессы в которых влияют на ледниковый биом и окружающие его ландшафты.

Ключевые слова: криокониты; экстремальные условия; предпочвы; перигляциальная зона.

SUPRAGLACIAL SOILS AND SOIL-LIKE BODIES: DIVERSITY AND ORGANOMINERAL INTERACTIONS

N. S. Mergelov, S. V. Goryachkin, E. P. Zazovskaya, A. V. Dolgikh

*Institute of Geography RAS, Staromonetny lane., 29, 119017,
Moscow, Russia, mergelov@igras.ru*

In recent decades, glaciers have been reviewed as a separate biome. Supraglacial organomineral formations have the most diverse composition and the highest rate of biological turnover among all components of the glacial biome. Here, we discuss the results of recent studies of organomineral formations on glaciers, their genesis, diversity and role in biosphere. The question is raised about the possibility of their involvement in the objects of soil science studies. The supraglacial zone is considered as an area of formation of soil and soil-like bodies, the biogeochemical processes in which affect the glacial biome and the surrounding landscapes.

Key words: cryoconites; extreme environments; pre-soils; periglacial zone.

В последние десятилетия ледники стали рассматривать как отдельный биом, ранее «забытый» в составе обитаемой криосферы [1].

Супрагляциальные органоминеральные образования обладают наиболее разнообразным составом и самой высокой скоростью биологического круговорота среди всех компонентов ледникового биома. В период абляции на леднике нет недостатка в жидкой воде, органических и минеральных примесях, взаимодействие которых приводит к появлению органоминеральных тел с новыми свойствами, меняющими структуру сообщества организмов, химический состав вещества и спектральные характеристики поверхности ледника так, как не сделал бы ни один из компонентов по отдельности. Анализ разнообразия, строения и процессов формирования супрагляциальных органоминеральных образований показал, что некоторые из них имеют признаки почв и почвоподобных тел [2, 3, 4, 5, 6 и др.]. Важнейшими из таких признаков являются накопление ОВ, его стабилизация на минеральных поверхностях и в агрегатах, трансформация ОВ с остаточным накоплением темноцветных твердофазных продуктов *insitu*. Среди супрагляциальных образований предлагается выделять [3] эфемерные предпочвы и почвоподобные тела во льду и снеге, метастабильные почвоподобные тела на криоконите и почвы с микропрофилями под моховыми сообществами на льду, а также относительно стабильные почвы с макропрофилями на мелкоземисто-обломочных отложениях с подстиланием ледников и мертвого льда. Легкодоступное ОВ, полученное в супрагляциальном «реакторе», в том числе в его ячейках — почвах и почвоподобных телах, оказывает существенное влияние на перигляциальную зону, приводя к резервуарному и прайминг-эффектам и воздействуя на все звенья трофической цепи, а также на формирование инициального почвенного покрова после отступления ледников.

Важный компонент органоминеральной фации на леднике — это криоконит, который подразделяется на инситный и переотложенный. Инситный криоконит формируется в «стаканах» протаивания, обеспечивающих стабильные условия для образования крупных сложноорганизованных гранул с множественными концентрическими слоями и микропрофилями в направлении центр-периферия, а также стратификацией между зоной первичной продукции органического вещества и зоной его преобразования гетеротрофными микробными сообществами.

Исследовано взаимодействие минеральных и органических компонентов в гранулах криоконита с ледников Алтая, Кавказа и Шпицбергена при помощи рентгеновской микротомографии, световой и сканирующей электронной микроскопии, а также рамановской спектроскопии. Агрегаты криоконита были разделены на мезогранулы (1-6 мм) и микрогранулы (0,1-1 мм). Мезогранулы часто состояли из более мелких субгранул, микрогранулы являлись первичными образованиями. Гранулы обеих групп имели сходную структуру и общую пористость в

пределах 15-16 %. Доля связанных пор была высокой и стабильной (88-89 %). Размеры пор находились в пределах 10-220 мкм (чаще 30-110 мкм) для мезогранул и 10-60 мкм (чаще 14-38 мкм) для микрогранул, при этом более крупные поры в обоих случаях были приурочены к центру гранул. Гранулы часто имели минеральный «зародыш», представленный зерном первичного минерала или обломком породы, а также уплотненный слой по периферии. Филлосиликаты (сметит, каолинит, хлорит, слюда) являлись важным компонентом, обеспечивающим физическую стабильность гранул наряду с бактериальными внеклеточными полимерами и нитчатыми цианобактериями. Наибольшая концентрация пылеватых и глинистых частиц (до 31,6 % сметитов) приходилась на периферическую часть гранул. В стенке гранул частицы минералов были наиболее плотно упакованы и ориентированы субпараллельно наружной поверхности. Кластеры глинистых минералов были всегда скреплены аморфным углеродсодержащим цементом. По данным рамановской спектроскопии метильные функциональные группы ($-CH_3$) в составе органического вещества были также приурочены к стенкам гранул, что свидетельствует о гидрофобных свойствах поверхности, необходимых для устойчивости криоконитовой микроэкосистемы в талой воде. Постоянная внешняя оболочка была важнейшим и самым сложноорганизованным компонентом гранулы, обеспечивающим стабильные условия для микробной трансформации органического вещества внутри гранул. Данные о строении и некоторых аспектах химического состава материала криоконита позволяют заключить, что его основная структурная единица, гранула, является самостоятельной сложноорганизованной многопорядковой микроэкосистемой, одновременно обособленной в водной супрагляциальной обстановке, но также и проницаемой для потоков вещества, благодаря развитой системе пор. Физические и химические механизмы стабилизации органоминеральных агрегатов криоконита сходны с принципами агрегации в сложных коллоидных системах, например почвах: (1) окклюзия/инкапсуляция, (2) образование гранул/оидов, (3) адсорбция на активных минеральных поверхностях, например, глинистых минералах, (4) гидрофильно-гидрофобные взаимодействия.

Помимо стратифицированных гранул криоконита, сходных с почвенными агрегатами, на поверхности ледников возможно образование микропрофилей первичных почв. Нами изучены профили, образовавшиеся под шаровидными колониями мха, так называемыми «ледниковыми мышками» [7] на ледниках о. Западный Шпицберген. Профили первичных почв состояли из нескольких микрогоризонтов, включая аналоги таких классических почвенных горизонтов как подстильно-торфяной, грубогумусовый и гумусово-слаборазвитый. Выявлено повсеместное участие гранулированного органоминерального материала криоконита, в том числе его инкапсуляция ризоидами мха.

Морфология, стратиграфия и органо-аккумулятивный тип распределения органического вещества указывают на формирование или сохранение почвоподобных микропрофилей под моховыми сообществами на поверхности ледника. Такие профили не могли сформироваться в течении одного сезона, длительность почвенных процессов дифференциации должна была достигать нескольких лет. Мы рассматриваем две гипотезы образования почвенных микропрофилей: (1) перигляциальное происхождение — подушка мха с прикрепленным дифференцированным на горизонты субстратом была занесена из окружающих ледник ландшафтов и (2) супрагляциальное происхождение — микропрофиль сформировался непосредственно на леднике при закреплении мха на минеральном субстрате, например на обломочном материале абляционной морены; споры мха были занесены ветром или птицами. Участие гранул криоконита во всех горизонтах профиля и тесная интеграция гранул с ризоидами мха и минеральной массой дополнительно указывают на длительное совместное образование именно в супрагляциальной обстановке.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00212.

Библиографические ссылки

1. Anesio A. M., Laybourn-Parry J. Glaciers and ice sheets as a biome // Trends in ecology & evolution. 2012. Vol. 27, iss. 4. P. 219–225.
2. Криокониты как факторы развития почв в условиях быстрого отступления ледника Альдегонда, Западный Шпицберген / Э. П. Зазовская [и др.] // Почвоведение. 2022. № 3. С. 281–295.
3. Супрагляциальные почвы и почвоподобные тела: разнообразие, генезис, функционирование (обзор) / Н. С. Мергелов [и др.] // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1522–1561.
4. Таширев А. Б., Таширева А. А., Березкина А. Е. Роль криоценозов в формировании почв на ледниках Западной Антарктики // Доповіді Національної академії наук України. 2012. № 4. С. 155–161.
5. Abakumov E., Nizamutdinov T., Polyakov V. Analysis of the polydispersity of soil-like bodies in glacier environments by the laser light scattering (diffraction) method // Biol. Comm. 2021. Vol. 66, iss. 3. P. 198–209.
6. Sediments from cryoconite holes and dirt cones on the surface of Svalbard glaciers: main chemical and physicochemical properties / T. Nizamutdinov [et al.] // Acta Geochimica. 2023. Vol. 42, iss. 2. P. 346–359.
7. Hotaling S., Bartholomaeus T. C., Gilbert S. L. Rolling stones gather moss: movement and longevity of moss balls on an Alaskan glacier // Polar Biology. 2020. Vol. 43, iss. 6. P. 735–744.