

**УДК 631.4**

**DOI: 10.18522/2308-9709-2025-52-1**

**Вертикальное профильное распределение углерода, азота и металлов в криогенных почвах и породах центральной части Цинхай-Тибетского плато**

Ван В.<sup>1</sup>, Абакумов Е. В.<sup>1</sup>, Ву С.<sup>2</sup>, Ли Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Китайская академия наук, Ланьчжоу, Китай*

<sup>3</sup>*Синьцзянский университет, Урумчи, Китай*

*E-mail: st082527@student.spbu.ru; e\_abakumov@sbpu.ru; wuxd@lzb.ac.cn; ligs1992@xju.edu.cn*

*Аннотация*

В статье представлены результаты исследования характеристик вертикального профильного распределения углерода, азота и металлов в криогенных почвах и породах центральной части Цинхай-Тибетского плато. В ходе исследования на трёх площадках отбора проб в зоне многолетнемёрзлых почв и пород был проведён анализ содержания органического углерода, общего азота и металлов в почвенном профиле на глубину 0–500 см, а также выполнено сопоставление их распределения в поверхностных (0–100 см) и глубоких (200–500 см) горизонтах. Полученные результаты свидетельствуют о выраженных различиях физико-химических свойств между верхними (0–100 см) и нижними (200–500 см) слоями почвенного профиля. Концентрации металлов по почвенному профилю варьируют в широком диапазоне, при этом для большинства металлов отмечены значимые положительные взаимосвязи. Кроме того, такие почвенные параметры, как pH, C/N, содержание неорганического углерода и электропроводность, оказывают отрицательное влияние на содержание металлов. Полученные данные подтверждают, что верхний слой почв преобразован под воздействием почвообразовательных процессов и криотурбации, тогда как нижний слой почв сохраняет преимущественно свойства материнских пород, а перераспределение металлов регулируется длительным

воздействием низких температур и окислительно-восстановительных условий. Полученные результаты представляют ценные новые данные для мониторинга окружающей среды в криосфере центральной части Евразии.

*Ключевые слова: криогенные почвы и породы, углерод, азот, металлы, Цинхай-Тибетское плато*

## **Vertical profile distribution of carbon, nitrogen and metal elements in the permafrost soils and parent materials on the Qinghai-Tibet plateau**

Wang W.<sup>1</sup>, Abakumov E. V.<sup>1</sup>, Wu X.<sup>2</sup>, Li G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> *Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China*

<sup>3</sup> *Xinjiang University, Urumqi, China*

*E-mail: st082527@student.spbu.ru; e\_abakumov@sbpu.ru;*

*wuxd@lzb.ac.cn; ligs1992@xju.edu.cn*

### *Abstract*

The article presents the results of a study on the vertical distribution of carbon, nitrogen, and metal elements in permafrost soils and parent materials on the central Qinghai-Tibet Plateau. Soil samples were collected at three sampling sites in the permafrost-affected region, with subsequently analysis of soil organic carbon, total nitrogen, and metal elements contents conducted at soil depths of 0–500 cm. Comparative analyses were conducted between shallow (0–100 cm) and deep (200–500 cm) soil layers. The results demonstrate significant differences in soil physicochemical properties between shallow (0–100 cm) and deep (200–500 cm) soil horizons. Metal concentrations vary widely along the soil profile, with significant positive correlations observed among most metal elements. Additionally, soil properties such as pH, C/N ratio, soil inorganic carbon, and electrical conductivity show negative correlations with metal elements. The findings indicate that the shallow soil layer is substantially altered by pedogenic processes and cryoturbation, whereas the deep soil layer primarily retains the characteristics of soil parent material, with metal redistribution regulated by long-term low temperature and redox conditions. These results provide valuable new data for environmental monitoring in the cryosphere of central Eurasia.

*Keywords: permafrost, carbon, nitrogen, metal elements, Qinghai-Tibet Plateau*

## **Введение**

Криогенные почвы (многолетнемёрзлые почвы, мерзлотные почвы и почвенно-мерзлотный комплекс) являются важнейшей составной частью криосферы (Street, Melnikov, 1990). Распределение многолетнемёрзлых почв и пород занимает около 16% площади суши земного шара (Obu et al., 2019; Zhang et al., 2008). Многолетнемёрзлые почвы и породы могут служить основным резервуаром углерода и металлов, и оказывают существенное влияние на криогенные экосистемы (Schuster et al., 2018; Lim et al., 2022). В условиях глобального потепления деградация криогенных почв может приводить к высвобождению ранее законсервированных веществ в мерзлоте (Farquharson et al., 2019; Miner et al., 2022). Особое внимание уделяется высокоширотным и высокогорным регионам, где темпы потепления примерно в полтора-два раза превышают среднемировые значения, что делает эти территории ключевыми для изучения деградации криогенных почв (Haeberli, Gruber, 2009; Крыленков и Гончаров, 2019).

Средняя высота Цинхай-Тибетского плато превышает 4000 м, а площадь распространения высокогорной многолетнемёрзлой зоны является крупнейшей в мире и составляет около  $1,06 \times 10^6$  км<sup>2</sup> (Zou et al., 2017). Цинхай-Тибетское плато известно как «крыша мира», «третий полюс» и «водонапорная башня Азии», влияющее на устойчивое и безопасное водоснабжение миллиардов людей в Азии и прилегающих районах (Immerzeel et al., 2010; Yao et al., 2012). При этом изменение климата также затрагивают зоны многолетнемерзлых почв и пород Цинхай-Тибетского плато (Haeberli, Gruber, 200). Исследование вертикального профильного распределения углерода, азота и металлов в многолетнемёрзлых почвах и породах центральной части Цинхай-Тибетского плато имеет значительное значение для экологической безопасности высокогорных территорий (Liu et al., 2022).

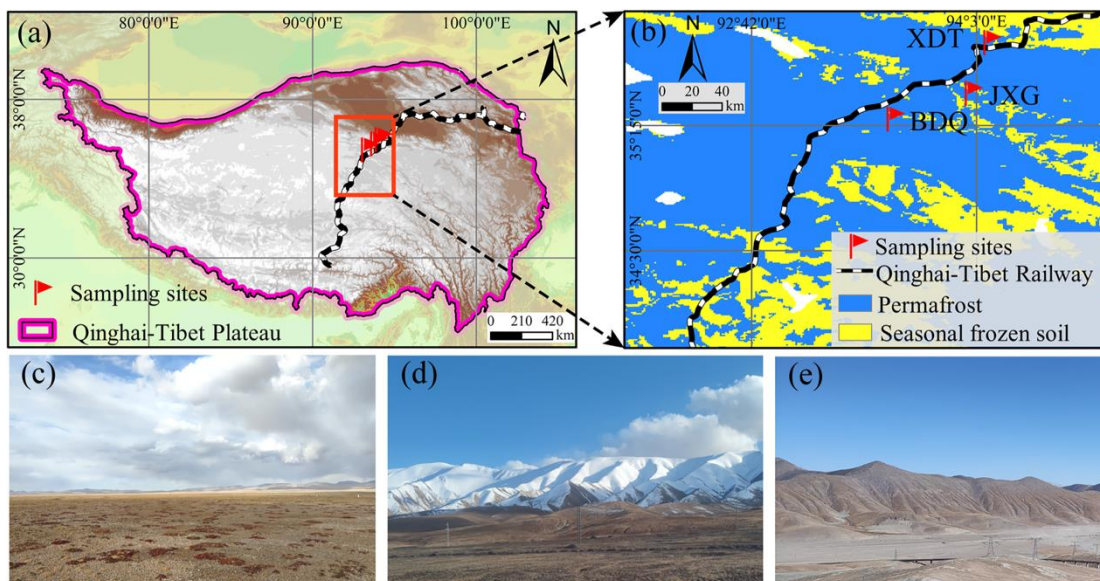
Многочисленные исследователи изучали изменения содержания

углерода, азота и металлов в верхнем слое многолетнемёрзлых почв и пород (Li et al., 2018; Olson et al., 2018; Mu et al., 2020; Wang et al., 2023). Поверхностный почвенный слой, подверженный сезонному промерзанию-оттаиванию и почвообразовательным процессам, характеризуется относительным накоплением углерода, азота и металлов (Mu et al., 2020; Wang et al., 2024). В то же время глубокие горизонты многолетнемёрзлой толщи находятся в устойчиво промёрзлом состоянии с медленными процессами перераспределения вещества, а их состав остаётся недостаточно изученным. В связи с этим изучение вертикального профильного распределения углерода, азота и металлов в глубоких слоях мерзлоты, а также выявление влияющих факторов необходимо для понимания биогеохимических процессов в криолитозоне в условиях глобального потепления.

Цель настоящего исследования заключается в выявлении особенностей вертикального профильного распределения углерода, азота и металлов в криогенных почвах и породах центральной части Цинхай-Тибетского плато.

### **Материалы и методы**

Исследования проводились в криогенных почвах и породах центральной части Цинхай-Тибетского плато. Три площадки отбора проб расположены в пределах координат от 34,22° до 35,71° с.ш. и от 93,54° до 94,12° в.д. с высотой от 4473 до 4792 м (рис. 1 (a), (b)). В период с сентября по октябрь 2021 г. с использованием механических буровых установок были отобраны три керны многолетнемёрзлых почв и пород (0–500 см) на площадках BDQ, XDT и JXG (рис. 1(c), (d) и (e)). На территории Цинхай-Тибетского плато преобладают слаборазвитые и криогенные почвы (Li et al., 2015). Отобранные пробы почвы хранились в полиэтиленовых пакетах, а затем были доставлены в лабораторию для дальнейших исследований.



*Рис. 1 — Расположение исследуемых территорий*  
 Примечание: (a) Карта Цинхай-Тибетского плато; (b) Три площадки отбора проб в центральной части Цинхай-Тибетского плато; (c, d, e) Фотографии трёх площадок (BDQ, XDT и JXG) отбора проб центральной части Цинхай-Тибетского плато.

### Лабораторные методы

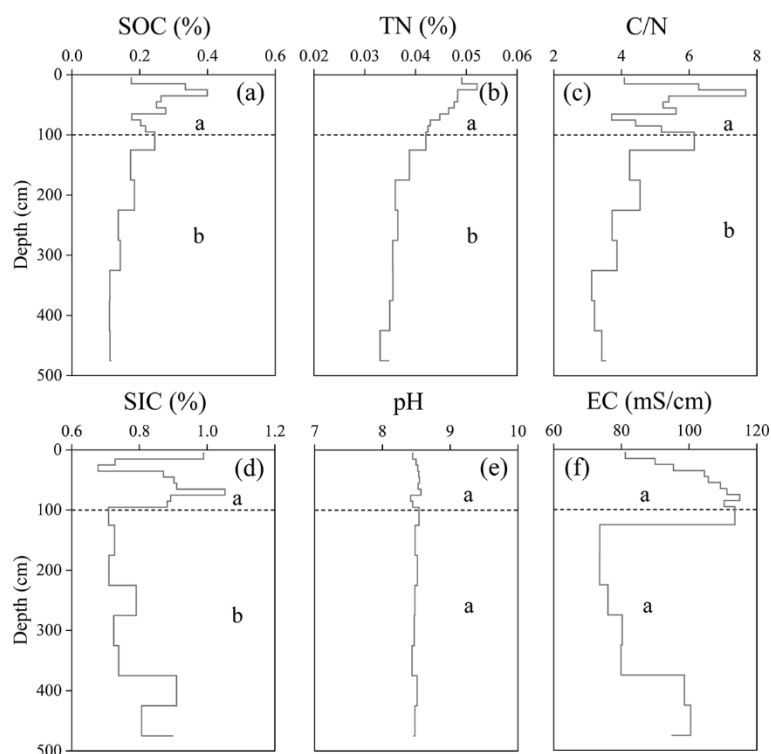
Пробы почв сушили, растирали и просеивали через нейлоновые сита с разным размером ячеек для последующего анализа. рН и электропроводность почвы измеряли с использованием рН-метра PHS-3E и ЕС-метра DDS-307. Содержание общего углерода и органического углерода почв определяли методом высокотемпературного сжигания с использованием автоматического анализатора углерода (Elementar Vario TOC Select, Германия). Содержание неорганического углерода почв вычисляли путём вычитания органического углерода почвы из содержания общего углерода почвы (Mu et al., 2020). Содержание общего азота почвы определяли методом Кьельдаля с применением автоматического анализатора Foss (Foss 8400, Швеция). Концентрации металлов в криогенных почвах Цинхай-Тибетского плато измеряли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Agilent 7700x, США). Для элементов с низкими концентрациями Cd использовали метод атомно-абсорбционной спектроскопии (PinAAcle 900T, США), Hg и As были определены методом атомной флуоресцентной спектроскопии (AFS 9710, Китай).

## Статистические методы

Критерий Шапиро–Уилка использовали для проверки нормальности распределения данных. Для данных с нормальным распределением применяли однофакторный дисперсионный анализ ANOVA (Least Significant Difference, Bonferroni и Tamhane's T2), а для данных с ненормальным распределением — непараметрический статистический метод (Kruskal-Wallis H-тест). Для анализа взаимосвязи между свойствами почвы и содержанием металлов использовали коэффициент корреляции Пирсона.

## Результаты и обсуждение

Средние значения физико-химических свойств почв на трёх площадках отбора проб в зоне многолетнемёрзлых пород центральной части Цинхай-Тибетского плато представлены на рис. 2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что верхний слой почвенного профиля является сезонно-талым слоем, формирующимся под воздействием периодического промерзания-оттаивания, с относительным обогащением органическим углеродом и общим азотом почвы. Напротив, нижний слой в почвах представляет собой длительно промёрзший материнский горизонт с слабо выраженными признаками почвообразования и более однородными физико-химическими свойствами. В верхнем слое почв (0–100 см, рис. 2(a)) среднее содержание органического углерода почв составляет 0,18–0,40%, общий азот почв — 0,04–0,05%, а соотношение C/N колеблется в пределах 3,71–7,67.



*Рис. 2 — Физико-химические свойства почв (0–500 см) в зоне многолетнемерзлых пород центральной части Цинхай-Тибетского плато*

*Примечание: SOC – органический углерод почв; TN – общий азот почв; C/N – SOC/TN; EC – электропроводность; Разные буквы (a и b) указывают на статистически значимые различия между поверхностными (0–100 см) и глубокими (200–500 см) горизонтами ( $p < 0,05$ ).*

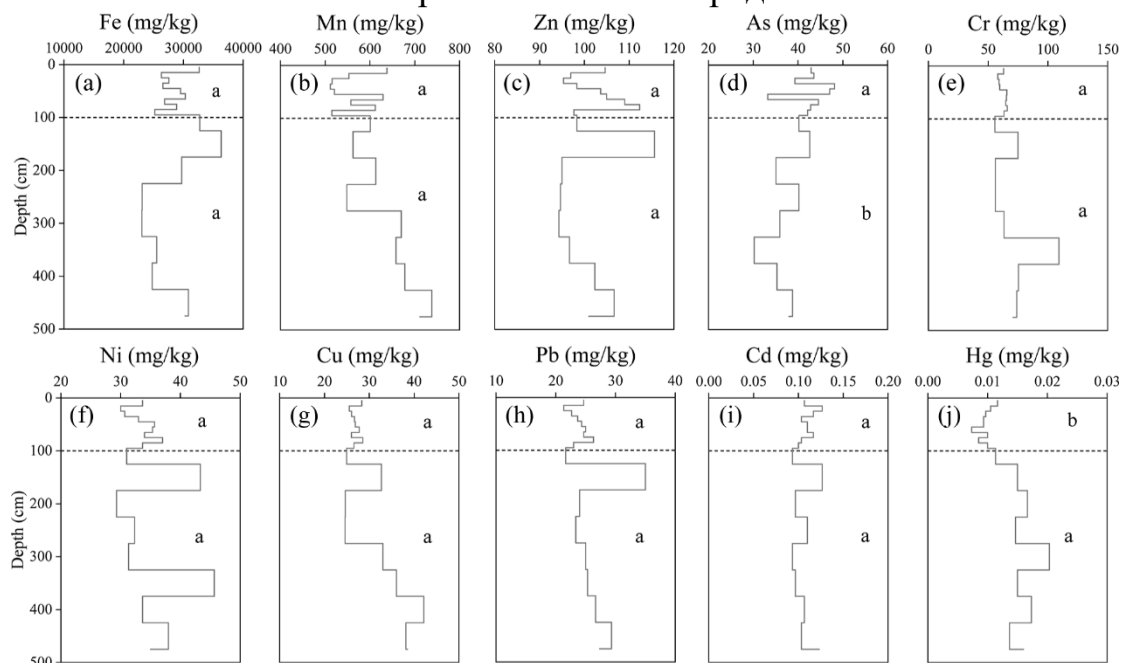
Почвенная среда слабо щелочная (pH 8,42–8,57), электропроводность почв повышена (81,13–114,97 мС/см), что отражает накопление органического вещества и солей под влиянием криогенных процессов и разрежённой высокогорной растительности (Крыленков и Гончаров, 2019; Wang et al., 2023). В нижнем слое почв (100–500 см, рис. 2(b)) среднее содержание органического углерода, общего азота, отношения C/N и неорганического углерода почв заметно снижается и стабилизируется, электропроводность почв уменьшается (<100 мС/см), а значение pH почв остаётся в пределах 8,44–8,53.

Это указывает на преобладание мерзлого материнского материала при длительной консолидации и слабом влиянии

поверхностных процессов. Таким образом, вертикальный профиль демонстрирует чётко выраженные различия между верхними и нижними слоями по характеру физико-химических свойств почв ( $p < 0,05$ ): верхний слой почв, как правило, более подвержен криотурбации (Таргульян, 2005; Liu et al., 2022) и характеризуется значительной вариабельностью физико-химических свойств, тогда как в глубоких горизонтах сохраняются относительно стабильные условия при низком содержании органического вещества.

Процессы криогенного массообмена в зоне многолетнемерзлых пород влияют на миграцию и аккумуляцию химических элементов в почвенном профиле (Wang et al., 2024). Вертикальное распределение металлов также отражает влияние окислительно-восстановительных условий на перераспределение этих химических элементов (Liu et al., 2022). На рис. 3 представлены средние вертикальные профили содержания металлов (Fe, Mn, Zn, As, Cr, Ni, Cu, Pb, Cd, Hg), полученные на трёх площадках отбора проб в зоне многолетнемерзлых пород центральной части Цинхай-Тибетского плато на глубину 0–500 см. Результаты однофакторного дисперсионного анализа показывают, что различия в содержании большинства металлов между верхними (0–100 см) и нижними (100–500 см) слоями профиля статистически незначимы ( $p > 0,05$ ). Тем не менее, вертикальное распределение демонстрирует сложную картину: в приповерхностной части профиля с увеличением глубины концентрации металлов снижаются, а затем вновь возрастают. В интервале 100–200 см, за исключением Mn, для остальных металлов характерно увеличение содержания, а в нижних горизонтах почвенного профиля также фиксируются незначительные колебания. Подобные особенности вертикальных трендов, вероятно, тесно связаны с длительной криотурбацией (включая повторяющееся промерзание-оттаивание, перераспределение влаги и т. д.) (Таргульян, 2005), способствующей перераспределению металлов по почвенному профилю. При этом чётко выраженные границы (например, в интервалах 100–200 см и 300–400 см) могут быть обусловлены изменениями окислительно-восстановительных условий в многолетнемерзлых почвах и породах (Kabata-Pendias, 2000; Weil, Brady, 2017; Wang et al., 2024). На этих барьерах, вероятно, меняются

условия аэрации и водного режима при циклах промерзания-оттаивания, что приводит к миграции и отложению ряда металлов в многолетнемерзлых почвах и породах.



*Рис. 3 — Распределение концентраций металлов в криогенных почвах и породах (0–500 см) центральной части Цинхай-Тибетского плато*

*Примечание: разные буквы (a и b) указывают на статистически значимые различия между поверхностными (0–100 см) и глубокими (200–500 см) горизонтами ( $p < 0,05$ ).*

Результаты корреляционного анализа содержания металлов и почвенных параметров в многолетнемерзлых почвах и породах представлены на рис. 4. Между большинством металлов наблюдается высокая корреляция, что указывает на схожий характер их миграции и аккумуляции в профиле многолетнемерзлой толщи. При этом для этих металлов характерна выраженная отрицательная корреляция с рН, свидетельствующая о том, что при снижении рН увеличивается их растворимость и подвижность — данный результат неоднократно отмечался в предыдущих исследованиях (Weil, Brady, 2017; Wang et al., 2024). Аналогичные отрицательные зависимости выявлены для соотношения C/N, содержания неорганического углерода почв и электропроводности. Повышение C/N указывает на медленную минерализацию органического вещества, затрудняющую

комплексообразование с металлами и приводящую к снижению их накопления (Weil, Brady, 2017). Увеличение содержания неорганического углерода почв отражает рост доли карбонатных минералов, которые способствуют иммобилизации металлов в виде труднорастворимых фаз, препятствуя их свободной миграции (Орлов, 1985; Weil, Brady, 2017). Возрастание электропроводности свидетельствует об увеличении содержания растворимых солей и повышении ионной силы раствора, при этом металлы либо перераспределяются вглубь профиля с водными потоками, либо осаждаются в других горизонтах, снижая локальное накопление (Weil, Brady, 2017).

Результаты корреляционного анализа также показывает, что Zn, As и Ni положительно связаны с содержанием органического углерода почв, тогда как для большинства металлов эта связь слабо выражена или отрицательна (Kabata-Pendias, 2000). Это может быть обусловлено локальными отличиями микросреды многолетнемерзлых почв — изменениями окислительно-восстановительных условий или содержанием растворённого органического углерода (Wang et al., 2024). В некоторых случаях металлы образуют прочные комплексы с органическим веществом, способствующие их удержанию, тогда как другие, напротив, мигрируют с растворённой органикой в более глубокие горизонты, формируя отрицательную связь с содержанием органического углерода почв (Kabata-Pendias, 2000; Weil, Brady, 2017).

Характерной особенностью является выраженная отрицательная взаимосвязь Cd с другими металлами. Это связано с его специфическим геохимическим поведением: при низком pH растворимость Cd возрастает, он легко перемещается с фильтрующимися водами при циклах промерзания-оттаивания, не аккумулируясь совместно с другими химическими металлами (Kabata-Pendias, 2000; Weil, Brady, 2017). В результате Cd в мерзлотной толще формирует отличную от других металлов вертикальную модель распределения и миграции, что объясняет его отрицательную корреляционную связь с остальными металлами.

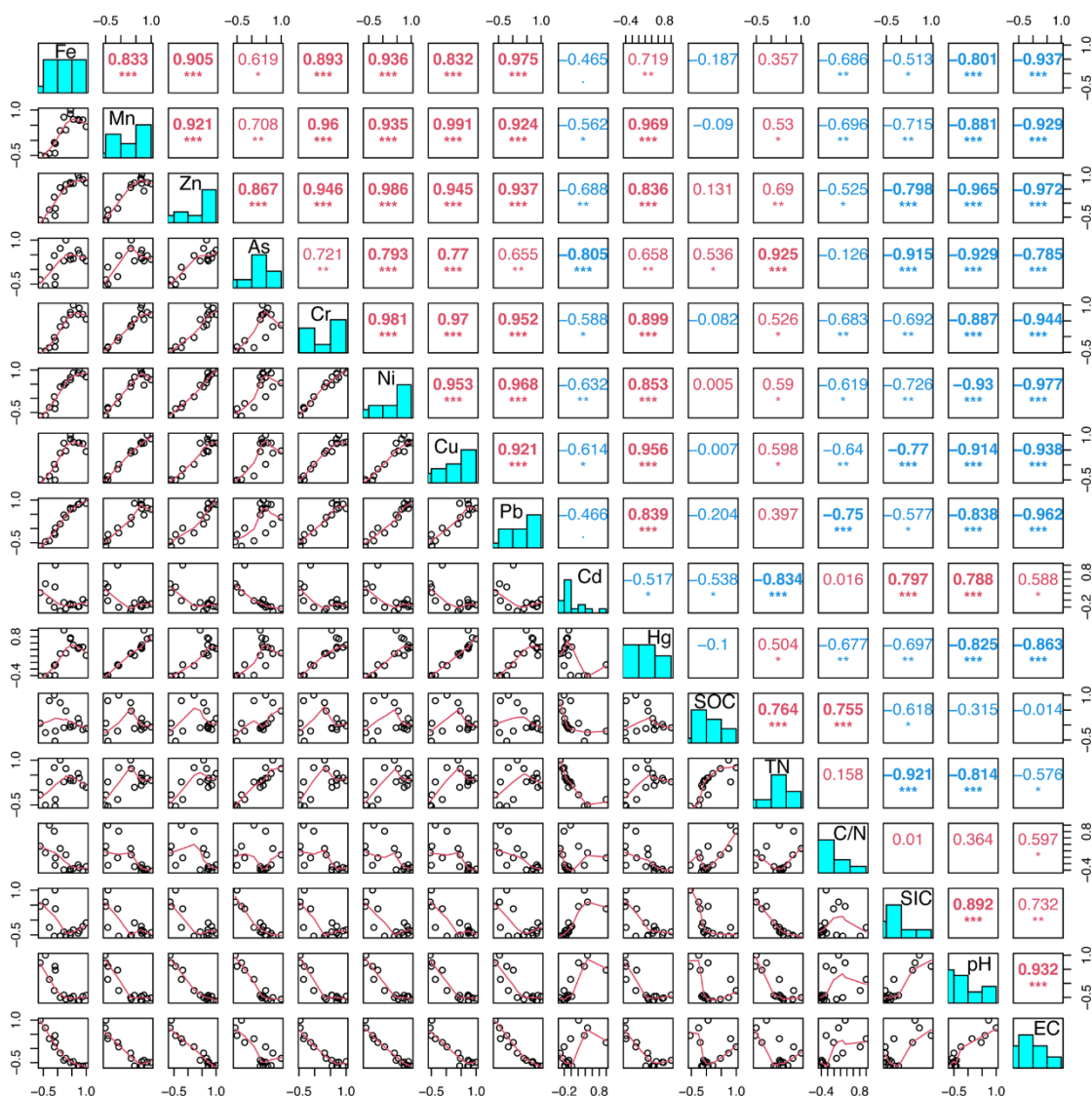


Рис. 4 — Коэффициенты корреляции Пирсона между металлами и физико-химическими свойствами в криогенных почвах Цинхай-Тибетского плато

Примечание: SOC – органический углерод почв; TN – общий азот почв; C/N – SOC/TN; EC – электропроводность; \*\*\*:  $p < 0,001$ , \*\*:  $p < 0,01$ , \*:  $p < 0,05$ .

## Заключение

Различия физико-химических свойств между верхними и нижними почвенными слоями в зоне многолетнемёрзлых пород центральной части Цинхай-Тибетского плато чётко выражены. Верхний слой почвы заметно преобразован под воздействием почвообразовательных процессов и повторяющегося промерзания-оттаивания (криотурбации), тогда как нижний слой

почвы преимущественно сохраняет характеристики материнских пород. Содержание металлов по профилю варьирует в широких пределах, при этом их распределение контролируется длительным воздействием низких температур и окислительно-восстановительных условий. Между большинством металлов наблюдается высокая корреляция, что свидетельствует о сходных механизмах их миграции и аккумуляции в многолетнемёрзлой толще. Кроме того, такие почвенные параметры, как pH, C/N, содержание неорганического углерода и электропроводность, оказывают выраженное отрицательное влияние на концентрации металлов, указывая на важную роль этих факторов в формировании вертикального профильного распределения металлов в многолетнемёрзлых почвах и породах.

**Финансовая поддержка:** Данная работа выполнена при поддержке Российский научный фонд (№ 24-44-00006) и Китайского стипендиального совета (201907010003).

### Список литературы

1. Крыленков, В.А., Гончаров А.Е. Микробиота земной криосферы. Санкт-Петербург: Издательство Фолиант, 2019. 448 с.
2. Орлов, Д.С. Химия почв: учебник. Москва: Издательство Московского университета, 1985. 376 с.
3. Таргульян, В.О. Элементарные почвообразовательные процессы // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1413–1422.
4. Farquharson, L.M., Romanovsky, V.E., Cable, W.L., Walker, D.A., Kokelj, S.V. Nicolsky, D. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian High Arctic // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. No. 12. P. 6681–6689. DOI: 10.1029/2019GL082187.
5. Haeberli, W. Gruber, S. Permafrost Soils: Global Warming and Mountain Permafrost // *Permafrost soils*. 2009. Vol. 16. P. 205–218.
6. Immerzeel, W.W., van Beek, L.P. Bierkens, M.F. Climate change will affect the Asian water towers // *Science*. 2010. Vol. 328. P. 1382–1385. DOI: 10.1126/science.1183188.
7. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants. CRC press, 2000. 403 p.

8. Li, L., Wu, J., Lu, J., Min, X., Xu, J., Yang, L. Distribution, pollution, bioaccumulation, and ecological risks of trace elements in soils of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. Vol. 166. P. 345–353. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.110.
9. Li, W., Zhao, L., Wu, X., Zhao, Y., Fang, H. Shi, W. Distribution of soils and landform relationships in the permafrost regions of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau // *Chinese Science Bulletin*. 2015. Vol. 60. P. 2216–2226. (in Chinese).
10. Lim, A.G., Loiko, S.V., Kuzmina, D.M., Krickov, I.V., Shirokova, L.S., Kulizhsky, S.P. Pokrovsky, O.S. Organic carbon, and major and trace elements reside in labile low-molecular form in the ground ice of permafrost peatlands: a case study of colloids in peat ice of Western Siberia // *Environmental Science: Process & Impacts*. 2022. Vol. 24. No. 9. P. 1443–1459. DOI: 10.1039/d1em00547b.
11. Liu, Y., Wang, J., Guo, J., Wang, L. Wu, Q. Vertical distribution characteristics of soil mercury and its formation mechanism in permafrost regions: A case study of the Qinghai-Tibetan Plateau // *Journal of Environmental Sciences*. 2022. Vol. 113. P. 311–321. DOI: 10.1016/j.jes.2021.06.016.
12. Miner, K.R., Turetsky, M.R., Malina, E., Bartsch, A., Tamminen, J., McGuire, A.D., Fix, A., Sweeney, C., Elder, C.D. Miller, C.E. Permafrost carbon emissions in a changing Arctic // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022. Vol. 3. No. 1. P. 55–67. DOI: 10.1038/s43017-021-00230-3.
13. Mu, C., Schuster, P.F., Abbott, B.W., Kang, S., Guo, J., Sun, S., Wu, Q. Zhang, T. Permafrost degradation enhances the risk of mercury release on Qinghai-Tibetan Plateau // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 708. P. 135127. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135127.
14. Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääh, A., Leibman, M.O., Lewkowicz, A.G., Panda, S.K., Romanovsky, V., Way, R.G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J. Zou, D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km<sup>2</sup> scale // *Earth Science Reviews*. 2019. Vol. 193. P. 299–316. DOI:

- 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
15. Olson, C., Jiskra, M., Biester, H., Chow, J. Obrist, D. Mercury in Active-Layer Tundra Soils of Alaska: Concentrations, Pools, Origins, and Spatial Distribution // *Global Biogeochemical Cycles*. 2018. Vol. 32. No. 7. P. 1058–1073. DOI: 10.1029/2017gb005840.
  16. Schuster, P.F., Schaefer, K.M., Aiken, G.R., Antweiler, R.C., Dewild, J.F., Gryziec, J.D., Gusmeroli, A., Hugelius, G., Jafarov, E., Krabbenhoft, D.P., Liu, L., Herman-Mercer, N., Mu, C., Roth, D.A., Schaefer, T., Striegl, R.G., Wickland, K.P. Zhang, T. Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. No. 3. P. 1463–1471. DOI: 10.1002/2017gl075571.
  17. Street, R.B. Melnikov, P.I. Seasonal snow cover, ice and permafrost // *Potential Impacts of Climate Change, Report for IPCC by Working Group*. Geneva: World Meteorological Organization, 1990. P. 7–35.
  18. Wang, W., Abakumov, E., Wu, X., Ji, X., Mu, C., Zhu, X. Li, G. Accumulation pattern and risk assessment of metal elements in permafrost-affected soils on the Qinghai-Tibet Plateau // *Catena*. 2023. V. 220. P. 106665. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106665.
  19. Wang, W., Abakumov, E., Wu, X., Chen, J., Li, G., Wang, D., Xu, H., Liu, G., Yang, S., Polyakov, V., Nizamutdinov, T., Ji, X. Effects of permafrost collapse on soil carbon, nitrogen, and metal elements on the Qinghai-Tibet Plateau // *Catena*. 2024. V. 246. P. 108425. DOI: 10.1016/j.catena.2024.108425.
  20. Weil, R.R. Brady, N.C. *The Nature and Properties of Soils* (15th edition). London: Pearson Education, 2017. 1104 p.
  21. Yao, T., Thompson, L.G., Mosbrugger, V., Zhang, F., Ma, Y., Luo, T., Xu, B., Yang, X., Joswiak, D.R., Wang, W., Joswiak, M.E., Devkota, L.P., Tayal, S., Jilani, R. Fayziev, R. Third Pole Environment (TPE) // *Environmental Development*. 2012. Vol. 3. P. 52–64. DOI: 10.1016/j.envdev.2012.04.002.
  22. Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Heginbottom, J.A. Brown, J. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere // *Polar Geography*. 2008. Vol. 31. No. 1–2. P. 47–68. DOI: 10.1080/10889370802175895.
  23. Zou, D., Zhao, L., Sheng, Y., Chen, J., Hu, G., Wu, T., Wu, J., Xie, C.,

Wu, X., Pang, Q., Wang, W., Du, E., Li, W., Liu, G., Li, J., Qin, Y., Qiao, Y., Wang, Z., Shi, J. Cheng, G. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau // *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11. No. 6. P. 2527–2542. DOI: 10.5194/tc-11-2527-2017.

## References

1. Krylenkov, V.A., Goncharov, A.E. Microbiota of the Earth's cryosphere. St. Petersburg: Foliant Publishers, 2019. 448 p. (in Russian).
2. Orlov, D.S. Soil Chemistry. Moscow: Moscow University Press, 1985. 376 p. (in Russian).
3. Targulian, V.O. Elementary soil forming processes // *Soil Science*. 2005. No. 12. P. 1413–1422. (in Russian).
4. Farquharson, L.M., Romanovsky, V.E., Cable, W.L., Walker, D.A., Kokelj, S.V. Nicolsky, D. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian High Arctic // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. No. 12. P. 6681–6689. DOI: 10.1029/2019GL082187.
5. Haeberli, W. Gruber, S. Permafrost Soils: Global Warming and Mountain Permafrost // *Permafrost soils*. 2009. Vol. 16. P. 205–218.
6. Immerzeel, W.W., van Beek, L.P. Bierkens, M.F. Climate change will affect the Asian water towers // *Science*. 2010. Vol. 328. P. 1382–1385. DOI: 10.1126/science.1183188.
7. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants. CRC press, 2000. 403 p.
8. Li, L., Wu, J., Lu, J., Min, X., Xu, J., Yang, L. Distribution, pollution, bioaccumulation, and ecological risks of trace elements in soils of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. Vol. 166. P. 345–353. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.110.
9. Li, W., Zhao, L., Wu, X., Zhao, Y., Fang, H. Shi, W. Distribution of soils and landform relationships in the permafrost regions of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau // *Chinese Science Bulletin*. 2015. Vol. 60. P. 2216–2226. (in Chinese).
10. Lim, A.G., Loiko, S.V., Kuzmina, D.M., Krickov, I.V., Shirokova, L.S., Kulizhsky, S.P. Pokrovsky, O.S. Organic carbon, and major and trace

- elements reside in labile low-molecular form in the ground ice of permafrost peatlands: a case study of colloids in peat ice of Western Siberia // *Environmental Science: Process & Impacts*. 2022. Vol. 24. No. 9. P. 1443–1459. DOI: 10.1039/d1em00547b.
11. Liu, Y., Wang, J., Guo, J., Wang, L. Wu, Q. Vertical distribution characteristics of soil mercury and its formation mechanism in permafrost regions: A case study of the Qinghai-Tibetan Plateau // *Journal of Environmental Sciences*. 2022. Vol. 113. P. 311–321. DOI: 10.1016/j.jes.2021.06.016.
  12. Miner, K.R., Turetsky, M.R., Malina, E., Bartsch, A., Tamminen, J., McGuire, A.D., Fix, A., Sweeney, C., Elder, C.D. Miller, C.E. Permafrost carbon emissions in a changing Arctic // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022. Vol. 3. No. 1. P. 55–67. DOI: 10.1038/s43017-021-00230-3.
  13. Mu, C., Schuster, P.F., Abbott, B.W., Kang, S., Guo, J., Sun, S., Wu, Q. Zhang, T. Permafrost degradation enhances the risk of mercury release on Qinghai-Tibetan Plateau // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 708. P. 135127. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135127.
  14. Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääb, A., Leibman, M.O., Lewkowicz, A.G., Panda, S.K., Romanovsky, V., Way, R.G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J. Zou, D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km<sup>2</sup> scale // *Earth Science Reviews*. 2019. Vol. 193. P. 299–316. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
  15. Olson, C., Jiskra, M., Biester, H., Chow, J. Obrist, D. Mercury in Active-Layer Tundra Soils of Alaska: Concentrations, Pools, Origins, and Spatial Distribution // *Global Biogeochemical Cycles*. 2018. Vol. 32. No. 7. P. 1058–1073. DOI: 10.1029/2017gb005840.
  16. Schuster, P.F., Schaefer, K.M., Aiken, G.R., Antweiler, R.C., Dewild, J.F., Gryziec, J.D., Gusmeroli, A., Hugelius, G., Jafarov, E., Krabbenhoft, D.P., Liu, L., Herman-Mercer, N., Mu, C., Roth, D.A., Schaefer, T., Striegl, R.G., Wickland, K.P. Zhang, T. Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury // *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. No. 3. P. 1463–1471. DOI:

- 10.1002/2017gl075571.
17. Street, R.B. Melnikov, P.I. Seasonal snow cover, ice and permafrost // Potential Impacts of Climate Change, Report for IPCC by Working Group. Geneva: World Meteorological Organization, 1990. P. 7–35.
  18. Wang, W., Abakumov, E., Wu, X., Ji, X., Mu, C., Zhu, X. Li, G. Accumulation pattern and risk assessment of metal elements in permafrost-affected soils on the Qinghai-Tibet Plateau // *Catena*. 2023. V. 220. P. 106665. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106665.
  19. Wang, W., Abakumov, E., Wu, X., Chen, J., Li, G., Wang, D., Xu, H., Liu, G., Yang, S., Polyakov, V., Nizamutdinov, T., Ji, X. Effects of permafrost collapse on soil carbon, nitrogen, and metal elements on the Qinghai-Tibet Plateau // *Catena*. 2024. V. 246. P. 108425. DOI: 10.1016/j.catena.2024.108425.
  20. Weil, R.R. Brady, N.C. The Nature and Properties of Soils (15th edition). London: Pearson Education, 2017. 1104 p.
  21. Yao, T., Thompson, L.G., Mosbrugger, V., Zhang, F., Ma, Y., Luo, T., Xu, B., Yang, X., Joswiak, D.R., Wang, W., Joswiak, M.E., Devkota, L.P., Tayal, S., Jilani, R. Fayziev, R. Third Pole Environment (TPE) // *Environmental Development*. 2012. Vol. 3. P. 52–64. DOI: 10.1016/j.envdev.2012.04.002.
  22. Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Heginbottom, J.A. Brown, J. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere // *Polar Geography*. 2008. Vol. 31. No. 1–2. P. 47–68. DOI: 10.1080/10889370802175895.
  23. Zou, D., Zhao, L., Sheng, Y., Chen, J., Hu, G., Wu, T., Wu, J., Xie, C., Wu, X., Pang, Q., Wang, W., Du, E., Li, W., Liu, G., Li, J., Qin, Y., Qiao, Y., Wang, Z., Shi, J. Cheng, G. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau // *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11. No. 6. P. 2527–2542. DOI: 10.5194/tc-11-2527-2017.

Статья поступила в редакцию 31 мая 2025 г.

Поступила после доработки 6 июня 2025 г.

Принята к печати 9 июня 2025 г.

Received May 31, 2025

Revised June 6, 2025

Accepted June 9, 2025

Ван В., Абакумов Е. В., Ву С., Ли Г., Вертикальное профильное распределение углерода, азота и металлов в криогенных почвах и породах центральной части Цинхай Тибетского плато // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 52; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-52/article-1>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-52-1