

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-33-39



## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ И ПРИРОДНЫХ ВОД ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ КРИОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА

✉ Гинзбург А.П.<sup>1</sup>, Лупачев А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru

В работе представлены предварительные результаты изучения физико-химических параметров почв и природных вод различного происхождения в прибрежно-морских криогенных ландшафтах на острове Западный Шпицберген в 2024 г. Исследованы кислотность, минерализация и окислительно-восстановительный потенциал морских, озерных и речных вод, почвенных растворов, а также талых снежников и льда. Оценено распределение этих параметров по геоморфологическим уровням. Установлены возможности формирования восстановительных латеральных геохимических барьеров в почвенно-геохимических катенах.

Ключевые слова: *криолитозона, кислотность, минерализация, окислительно-восстановительный потенциал, водная миграция, Грэн-Фьорд, Колсбей, Арктика*

**Введение.** Архипелаг Шпицберген – территория с уникальным ландшафтно-геологическим и биологическим разнообразием. Кроме того, это единственный регион северной Европы, где многолетнемёрзлые породы (ММП) являются важным фактором развития и современного функционирования экосистем не только в высокогорных районах, но и на обширных участках равнин и низменностей [Jónsdóttir, 2005]. Крайне уязвимые к климатическим изменениям и возрастающей антропогенной нагрузке криогенные арктические экосистемы в настоящее время переживают этап значительных преобразований, в т.ч. в связи с сокращением площади и вертикальной мощности ММП [Humlum et al., 2003]. Динамика многолетней мерзлоты широтах вызывает активизацию криогенных процессов [Кротков и др., 2019], а также провоцирует радиальные и латеральные перемещения химических веществ (в т.ч. потенциальных экотоксикантов) в ландшафтах [Глазовская, 1981; Горячкин, 2010; Ji et al., 2021].

Криогенные ландшафты Арктики и субарктики представляют собой весьма сложные ландшафтно-геохимические системы с разветвленной сетью направлений латеральных и радиальных потоков химических веществ. К причинам её формирования относят неоднородность литогенной основы [Горячкин, 2010], мозаичность ландшафтных условий на мезо- и микроуровнях [Васильевская и др., 1993; Walker et al., 2005], а также контрастность рельефа кровли ММП [Лупачёв и др., 2016; Трегубов, 2017].

Изучение условий и особенностей водной миграции химических веществ в почвах и ландшафтах арктических территорий необходимо для моделирования возможных геохимических последствий их изменений ввиду деградации ММП и сопутствующих преобразований ландшафтов.

**Объекты исследований.** Район работ расположен в западной части о. Западный Шпицберген. Ключевые участки находятся на приморских низменностях в зал. Грэн-Фьорд и бух. Колсбей. Участок № 1 приурочен к оз. Бретьорна и южному берегу зал. Грэн-Фьорд. Участки № 2, 3 и 4 – к западному берегу Грэн-Фьорда, где приустьевые части русел рек и ручьёв пересекают достаточно широкие низменные участки морских аккумулятивных берегов. Участки № 5 и 6 – к восточному берегу Грэн-Фьорда, в районах м. Финнисет и приустьевой части долины р. Грэндалсельва. Участок № 7 располагается в районе сдвоенного устья рр. Колсельва и Сьюнна при их впадении в бух. Колсбей) (рис. 1). Каждый из участков представляет собой фрагмент территории со сложной литогенной

основой, микро- и мезоландшафтно-геоморфологической структурой, формирующей мозаичность почвенно-растительного покрова и мощностей СТС.

Климатические условия Шпицбергена типичны для высоких широт западной Арктики – среднегодовая температура воздуха в Баренцбурге равна  $-3,8^{\circ}\text{C}$ , вегетационный период длится не более 70 дней, а сумма температур выше  $+10^{\circ}\text{C}$  не превышает  $450^{\circ}\text{C}$  за год. Сумма осадков достаточно высокая для арктических тундр – около 565 мм/год. Мощность снежного покрова достигает 1,5-2 м [Андреева и др., 2019]. Ландшафты Шпицбергена характеризуются как типичные арктические тундры [Walker et al., 2005]. Каменистые субстраты, обеднённые питательными веществами, распространены здесь наиболее широко, растительный покров на них чаще всего фрагментарный.

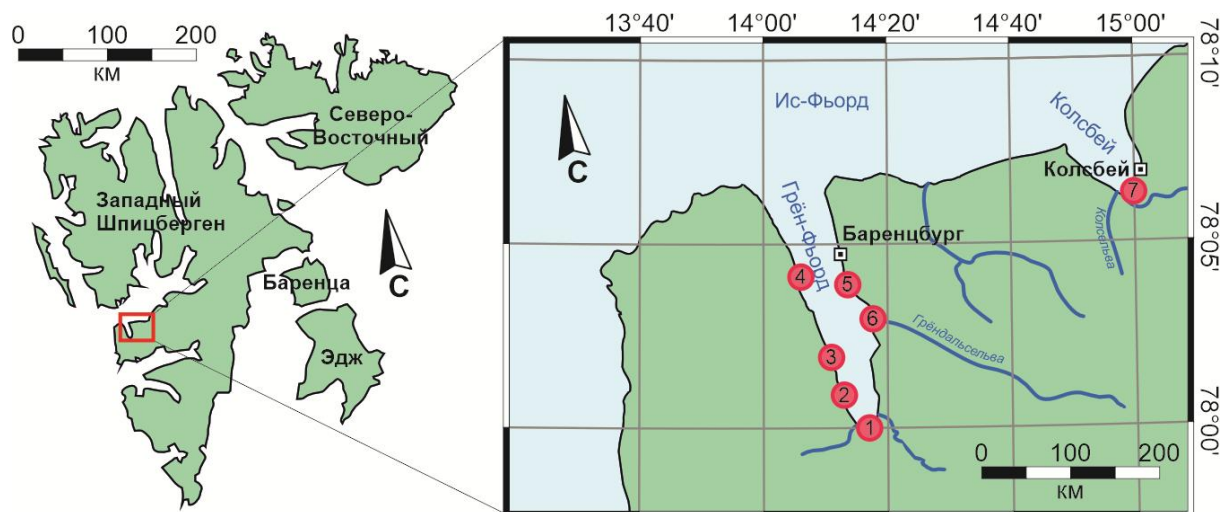


Рис. 1. Картограмма территории исследования с указанием ключевых участков.

Большая часть исследованных ландшафтов приурочена к разновозрастным морским террасам. ОСЛ-датирование отложений трёх террас показало следующие результаты: I терраса (5,5 м н.у.м.) –  $4,4 \pm 0,2$  тыс. лет, II (11,1 м н.у.м.) –  $7,3 \pm 0,4$  тыс. лет, III (41,6 м н.у.м.) –  $12,8 \pm 1,1$  тыс. лет [van der Meij et al., 2016]. В целом по архипелагу распространение ММП является сплошным [Humlum et al., 2003], однако в глубоких речных долинах и на приморских низменностях наблюдаются крупные талики [Etzemüller et al., 2011]. Варьирование мощностей СТС составляет от 60-70 см до более чем 250 см в пределах различных форм мезо- и микрорельефа [Демидов и др., 2016], а температуры ММП варьируют в них от  $-5$  до  $-2^{\circ}\text{C}$  [Romanovsky et al., 2010]. В криогенном строении верхних горизонтов ММП долины Адвентдален выделяются высокольдистые слои с сетчатыми и линзовидными криогенными текстурами, предположительно, являющиеся переходными и промежуточными [Tolgensbakk et al., 2000].

**Методы исследований.** Физико-химические параметры природных вод различного происхождения исследовались при помощи портативных полевых ион-селективных электродов NM Digital (Hydromaster Inc., Республика Корея): PH-200 для измерения актуальной кислотности (pH), ORP-200 – для окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и COM-100 – для электропроводности (и минерализации – TDS) с автокомпенсацией по температуре, а также портативного мультиметра HI 98127 Combo (Hanna Instruments Inc., Германия) – для pH и TDS. Всего было проведено 26 комплексных измерений физико-химических параметров вод. Кроме того, были изучены почвы на ключевых участках с целью выявления некоторых их морфологических особенностей, которые могут указывать на резкую смену окислительно-восстановительных условий.

Особенности латеральной дифференциации физико-химических параметров были изучены на основе катенарного подхода. Названия и индексы родов ЭГЛ даны по М.А.

Глазовской [1964] и М.Д. Богдановой с коллегами [2012]. Коэффициент латеральной дифференциации ( $L$ ) вычислялся по формуле:  $L_x = C_{xПЛ}/C_{xАЛ}$ , где  $C_{xПЛ}$  – значение параметра  $x$  в подчинённом ЭГЛ,  $C_{xАЛ}$  – значение параметра  $x$  в автономном (элювиальном) ЭГЛ [Глазовская, 1964].

Таблица 1. Расшифровка сокращённых названий типов ЭГЛ.

Тип ЭГЛ (индекс)	Формы и элементы форм рельефа
Элювиальный (Э)	Плоские водораздельные поверхности, выпуклые вершины, надпойменные террасы, чётко выраженные в рельефе
Трансэлювиальный (ТЭ)	Склоны различной крутизны
Трансаккумулятивно-элювиальный (ТАЭ)	Надпойменные террасы, перекрытые делювиальными шлейфами, склоны приводораздельные террасовидные
Транзитный периодически супераквальный (ТС)	Высокие и средние поймы
Супераквальный транзитный (СТ)	Низкие поймы
Аквальный (А)	Реки и др. водные объекты

**Результаты исследования. рН.** Значения рН варьируют от 6,7 до 9,2 (рис. 2). Самые высокие значения имеют морские воды (рН 8,1-9,2). Тип вод является ведущим фактором формирования уровня рН среды ЭГЛ – близость к морю и наличие устойчивой гидравлической связи вод суши с морем приводит к тому, что реакция среды грунтовых вод в ландшафтах низменных периодически затопляемых морских берегов является щелочной. Максимальное значение рН 9,2 характерно для вод в заводях, изолированных от моря, а минимальные – в почвах, разрезы которых были заложены на возвышенных участках рельефа на удалении от берега. Явной закономерности увеличения или уменьшения среднего значения рН в модельной геохимической катене не наблюдается. Коэффициент  $L$  отличается от 1 незначительно на протяжении всего ряда ЭГЛ (рис. 3).

**Eh.** Значения Eh демонстрируют широкий разброс от –3 до 246 мВ. Весь диапазон значений свойственен восстановительной среде (<400 мВ) (рис. 2). К явным признакам восстановительных условий в ландшафтах низких аккумулятивных морских берегов относятся резкий запах сероводорода и развитое в профилях почв оглеение. Самое низкое значение Eh –3 мВ характерно для грунтовой воды в профиле глеезёма, уровень грунтовых вод в котором залегает практически наравне с поверхностью почвы. Относительно высокие значения Eh (от 130 мВ и выше) характерны для речных и озерных вод. Выделяется закономерность постепенного уменьшения Eh вниз по рельефу и резкое снижение значений при переходе к аквальным ландшафтам ( $L = 0,65$ ). Низменные участки рельефа, расположенные в зоне активных сгонно-нагонных процессов, постоянно переувлажнённые за счёт устойчивой гидравлической связи с морем, являются латеральными восстановительными геохимическими барьерами и потенциальными зонами аккумуляции веществ, как осаждающихся в ходе морской аккумуляции, так и вследствие латеральной миграции из вышележащих позиций рельефа.

**TDS.** Важнейшим фактором дифференциации значений TDS является тип вод, который в данном случае определяет варьирование как средних, так и максимальных значений TDS. Практически пресными водами (TDS не более 0,05 г/л) отличаются снега и льды, чуть выше минерализация озерных и речных вод (TDS до 1,5 г/л). В почвах участков, расположенных в непосредственной близости к морю, значения TDS нередко превышали 3,0 г/л, а иногда и превышали аналитический предел, а почвенные растворы в профилях на возвышенных участках рельефа, были близки к пресным. Устойчивый рост значений TDS заметен вниз по катене (рис. 3).

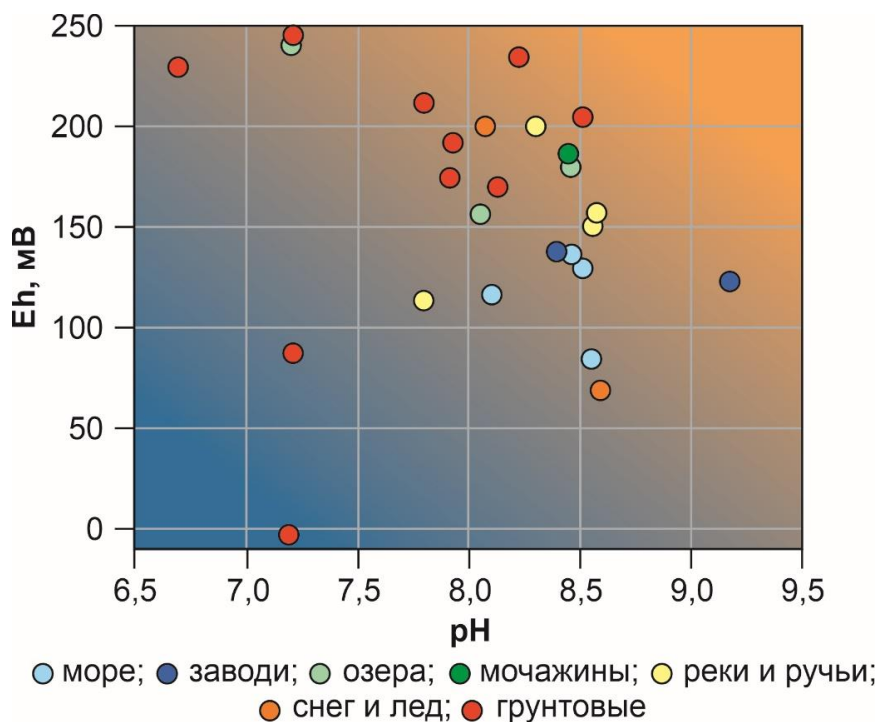


Рис. 2. Диаграмма pH-Eh изученных в 2024 г. природных вод на Западном Шпицбергене.

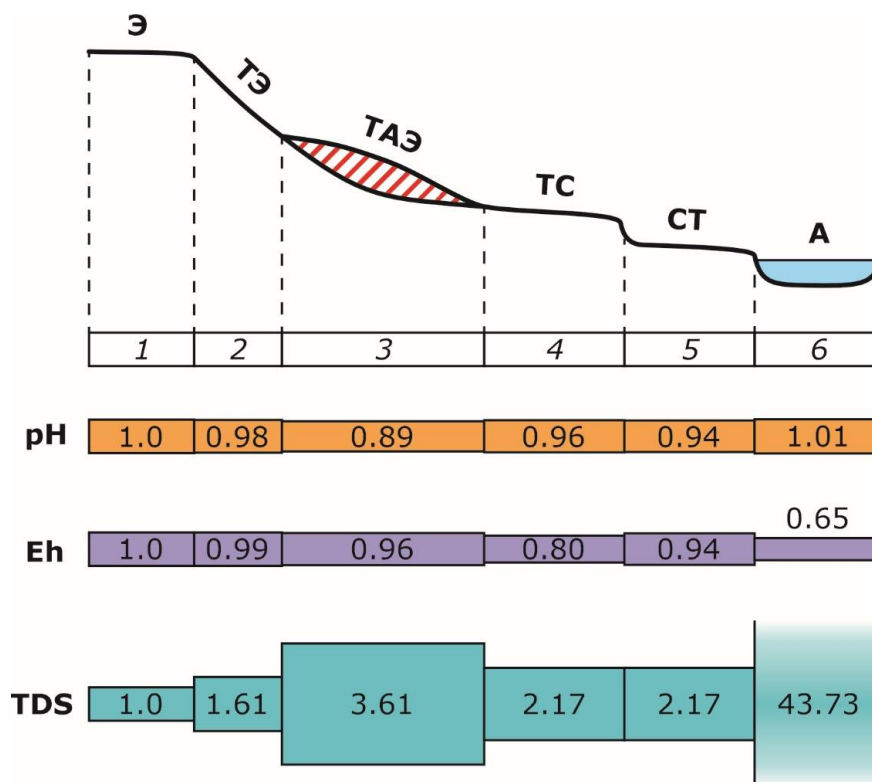


Рис. 3. Катенарное распределение (коэффициент L) физико-химических параметров изученных в 2024 г. природных вод на Западном Шпицбергене.

**Выводы.** Таким образом в ходе исследований физико-химических свойств природных вод Западного Шпицбергена в 2024 г. были установлены основные особенности их распределения в типичных ландшафтно-геохимических катенах. В элювиальных ЭГЛ, приуроченных к выраженным в рельефе поверхностям морских террас, наблюдаются более кислые озёрные и мочажинные воды, а также почвенные растворы ( $pH = 6,5-7,5$ ), а ниже по рельефу типичной катены эти значения повышаются. В прибрежно-морской зоне на низменных морских периодически затопляемых берегах pH

некоторых исследованных вод превышает 9,0. Однако в среднем распределение рН вод в пределах ЭГЛ прибрежно-морских ландшафтов монотонное, значения коэффициента L варьируют от 0,89 до 1,01. Значительно контрастнее в ЭГЛ распределены значения TDS: элювиальные ландшафты, находящиеся на удалении от моря вод, характеризуются практически пресными озёрными водами и почвенными растворами (менее 0,1–0,05 г/л). В средних частях склонов значения L возрастают до 3,61. Предположительно, это может быть связано с проявлением роли суглинистых отложений делювиального шлейфа как геохимического барьера, а также с изначальным засолением отложений делювиального шлейфа. Особенно контрастное распределение значений L наблюдалось при переходе к низменным участкам морских аккумулятивных берегов. Это связано с ведущей ролью морских вод в формировании свойств почвенных растворов на этих участках. Также переход к морским аккумулятивным берегам с периодическим затоплением характеризуется достаточно резким падением значения Eh. Следовательно, в этой прибрежно-морской зоне способны сформироваться достаточно контрастные латеральные восстановительные геохимические барьеры. Эта зона является наиболее интересной с точки зрения дальнейших исследований, поскольку обладает способностью к накоплению веществ, не только аккумулирующихся в результате сгонно-нагонных процессов на море, но и поступающих с латеральным стоком из вышележащих ЭГЛ.

**Благодарности.** *Исследование проведено в рамках Госзадания № 123071700018-6 (ИФХиБПП РАН). Авторы благодарят сотрудников Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) арктического и антарктического научно-исследовательского института (ФГБУ АНИИ) за помощь в организации и проведении полевых и лабораторных работ в районе Баренцбурга, а также центр арктического туризма «Грумант» (подразделение ФГУП ГТ «Арктикуголь») за помощь в организации полевых работ в бухте Колсбей.*

## ЛИТЕРАТУРА

*Андреева Е.С., Липовицкая И.Н., Андреев С.С.* Современные особенности погодноклиматического режима острова Западный Шпицберген и их вклад в рассеивание антропогенных примесей // *Общество. Среда. Развитие.* 2019. № 2. С. 68–72.

*Богданова М.Д., Гаврилова И.П., Герасимова М.И.* Элементарные ландшафты как объекты ландшафтно-геохимического картографирования // *Вестник МГУ. Сер. 5. Геогр.,* 2012. № 1. С. 23–28.

*Васильевская В.Д., Караваева Н.А., Наумов Е.М.* Формирование структуры почвенного покрова полярных областей // *Почвоведение.* 1993. № 7. С. 44–55.

*Глазовская М.А.* Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. 229 с.

*Глазовская М.А.* Теория геохимии ландшафтов в приложении к изучению техногенных потоков рассеяния и способности природных систем к самоочищению // *Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем.* М., 1981. С. 7–40.

*Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.

*Демидов Н.Э., Караевская Е.С., Веркулич С.Р. и др.* Первые результаты мерзлотных наблюдений на криосферном полигоне Российского научного центра на архипелаге Шпицберген (РНЦШ) // *Проблемы Арктики и Антарктики,* 2016. № 4 (110). С. 67–79.

*Кротков В.Е., Письменюк А.А., Кизяков А.И.* Территориальная дифференциация проявления криогенных процессов на Земли Норденшельда // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России.* 2019. Выпуск 6. С. 66–70. doi:10.24411/2687-1092-2019-10611

*Лупачёв А.В., Губин С.В., Веремеева А.А. и др.* Микрорельеф поверхности многолетнемерзлых пород: строение и экологические функции // *Криосфера Земли.* 2016. Т. XX. № 2. С. 3–14.

Трегубов О.Д. Геохимические барьеры в почвах и ландшафтах Анадырской тундры // Вестник МГУ. Сер. 5. Геогр., 2017. № 3. С. 70–79.

Etzemüller, B., Schuler, T.V., Isaksen, K. et al. Modeling the temperature evolution of Svalbard permafrost during the 20th and 21st century // Cryosphere. 2011. Vol. 5. P. 67-79. doi: 10.5194/tc-5-67-2011

Humlum O., Instanes A., Sollid J.L. Permafrost in Svalbard: a review of research history, climatic background and engineering challenges // Polar Research. 2003. Vol. 22. Is. 2. P. 191–215. doi: 10.3402/polar.v22i2.6455

Ji X., Abakumov E., Polyakov V., Xie X. Mobilization of geochemical elements to surface water in the active layer of permafrost in the Russian Arctic // Water Resources. 2021. Vol. 57, e2020WR028269. doi: 10.1029/2020WR028269

Jónsdóttir I.S. Terrestrial ecosystems on Svalbard: heterogeneity, complexity and fragility from an Arctic island perspective // Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy. 2005. Vol. 105B, No. 3. P. 155–165. doi: 10.3318/BIOE.2005.105.3.155

Romanovsky, V.E., Smith, S.L., Christiansen, H.H. Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis // Permafrost and Periglacial Processes. 2010. Vol. 21. Is. 2. P. 106-116. doi: 10.1002/ppp.689

Tolgensbakk, L., Sørbel, J., Høgvard K. Adventdalen, Geomorphological and Quaternary Geological map, Svalbard 1:100 000, Spitsbergen sheet C9Q. 2000. Norsk Polarinstitut Temakart nr. 32.

van der Meij W.M., Temme A.J.A., de Kleijn C.M.F.J.J. et al. Arctic soil development on a series of marine terraces on central Spitsbergen, Svalbard: a combined geochronology, fieldwork and modelling approach // SOIL. 2016. Vol. 2. P. 221-240. doi: 10.5194/soil-2-221-2016

## PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS AND NATURAL WATERS OF MARITIME CRYOGENIC LANDSCAPES AT WESTERN SPITSBERGEN

Ginzburg A.P., Lupachev A.V.

Institute of physico-chemical and biological problems in soil science RAS, Pushchino, Russia

The preliminary results of the soils' and natural waters' physico-chemical parameters investigation in maritime cryogenic landscapes at Western Spitsbergen in 2024 are presented. The acidity, mineralization and oxidation-reduction potential of sea, lake and river waters, soil solutions and thawed snow and ice, were obtained. The distribution of these parameters across geomorphological levels was evaluated. The potential of reductive lateral geochemical barriers in soil-geochemical catenas was stated.

Keywords: *Permafrost zone, acidity, mineralization, oxidation-reduction potential, water migration, Grön-Fjord, Colesbay, Arctic*

### REFERENCES:

Andreeva E.S., Lipoviyskaya I.S., Andreev S.S. Modern features of weather and climate regime at Western Spitsbergen and their input in the depletion of anthropogenic emissions // Society. Environment. Development, 2019. No. 2. pp. 68-72. (In Russ.)

Bogdanova M.D., Gavrilova I.P., Gerasimova M.I. Elementary landscapes as objects of landscape-geochemical mapping // Moscow University Bull. Ser. 5. Geogr., 2012. No. 1. pp. 23-28. (In Russ.)

Vasilievskaya V.D., Karavaeva N.A., Naumov E.M. Soil cover structure formation in the polar regions of the Earth // Eurasian Soil Science, 1993. No. 7, pp. 44–55. (In Russ.)

Glazovskaya M.A. Geochemical basis of typology and methods of the environment investigations. Moscow, Moscow University Press., 1964. (In Russ.)

Glazovskaya M.A. The landscape geochemistry theory in addition to the study of technogenic streams and the ability of environmental self-cleaning // Technogenic streams of matter in landscapes and ecosystem state. Moscow, 1981. pp. 7–40. (In Russ.)

Goryachkin S.V. Soil cover of the North (structure, genesis, ecology, evolution). Moscow, GEOS, 2010. 414 p. (In Russ.)

*Demidov N.E., Verkulich S.R., Karaevskaya E.S. et al.* First results of permafrost monitoring on the cryospheric site of Russian Scientific Center on Spitsbergen (RSCS) // *Problems of Arctic and Antarctic*, 2016. No. 4 (110). pp. 67-79. (In Russ.)

*Krotkov V.E., Pismeniuk A.A., Kizyakov A.I.* Areal differentiation of the cryogenic processes manifestation on the Nordenskiöld Land (West Spitsbergen) // *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2019. Issue 6. P. 66-70. doi:10.24411/2687-1092-2019-10611 (In Russ.)

*Lupachev A.V., Gibin S.V., Veremeeva A.A. et al.* Microrelief of the permafrost table: structure and ecological functions // *Earth's Cryosphere*, 2016. vol. XX, No. 2, p. 3–14. (In Russ.)

*Tregubov O.D.* Geochemical barriers in soils and landscapes of the Anadyr tundra // *Moscow University Press. Ser. 5. Geogr.*, 2017. No. 3. pp. 70-79. (In Russ.)

*Etzemüller, B., Schuler, T.V., Isaksen, K. et al.* Modeling the temperature evolution of Svalbard permafrost during the 20th and 21st century // *Cryosphere*. 2011. Vol. 5. P. 67-79. doi: 10.5194/tc-5-67-2011

*Humlum O., Instanes A., Sollid J.L.* Permafrost in Svalbard: a review of research history, climatic background and engineering challenges // *Polar Research*. 2003. Vol. 22. Is. 2. P. 191–215. doi: 10.3402/polar.v22i2.6455

*Ji X., Abakumov E., Polyakov V., Xie X.* Mobilization of geochemical elements to surface water in the active layer of permafrost in the Russian Arctic // *Water Resources*. 2021. Vol. 57, e2020WR028269. doi: 10.1029/2020WR028269

*Jónsdóttir I.S.* Terrestrial ecosystems on Svalbard: heterogeneity, complexity and fragility from an Arctic island perspective // *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*. 2005. Vol. 105B, No. 3. P. 155–165. doi: 10.3318/BIOE.2005.105.3.155

*Romanovsky, V.E., Smith, S.L., Christiansen, H.H.* Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010. Vol. 21. Is. 2. P. 106-116. doi: 10.1002/ppp.689

*Tolgensbakk, L., Sørbel, J., Høgvard K.* Adventdalen, Geomorphological and Quaternary Geological map, Svalbard 1:100 000, Spitsbergen sheet C9Q. 2000. Norsk Polarinstitut Temakart rr. 32.

*van der Meij W.M., Temme A.J.A., de Kleijn C.M.F.J.J. et al.* Arctic soil development on a series of marine terraces on central Spitsbergen, Svalbard: a combined geochronology, fieldwork and modelling approach // *SOIL*. 2016. Vol. 2. P. 221-240. doi: 10.5194/soil-2-221-2016