

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2022. № 2. (115). С. 58-77.

Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2022. № 2. (115). P. 58-77.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 631.48

doi: 10.26110/ARCTIC.2022.115.2.004

АНАЛИЗ ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ КРИОКОНИТА НА ЛЕДНИКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

Вячеслав Игоревич Поляков¹, Евгений Васильевич Абакумов², Алена Александровна Лахтионова³, Булат Рафаэлевич Мавлюдов⁴

^{1,2,3}Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт географии РАН, Москва, Россия

¹slavon6985@gmail.com

²e_abakumov@mail.ru

³lakhtionova.alena@gmail.com

⁴mavlyudov@igras.ru

Аннотация. Формирование криоконита обусловлено накоплением на поверхности ледников частиц черного углерода и минеральных отложений. Аккумуляции криоконита способствуют проявлению сильного светопоглощающего эффекта, который приводит наряду с другими факторами (изменение климата, антропогенная деятельность) к активной дегляциации в горных и полярных районах по всему миру. В данной работе представлены результаты анализа полидисперсности, физико-химических и химических параметров органоминеральных отложений, извлеченных из криоконита, а также почвоподобных тел, сформированных на поверхности ряда ледников в окрестностях поселка Баренцбург, Шпицберген. Криоконит в отмерших колодцах и в трещинах ледников аккумулирует существенное количество органического углерода по сравнению с криоконитом, формирующимся на поверхности ледника. В результате

анализа полидисперсности органоминеральных отложений было установлено, что в значительной степени накапливаются мелкий песок, крупная пыль, а также до 30% ила. Накопление крупной пыли и ила преимущественно имеет атмосферный характер, более крупные частицы – локальное происхождение.

Ключевые слова: криоконит, почвоподобные тела, полидисперсность, архипелаг Шпицберген, Арктика.

Благодарности: работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-05-50107. Авторы выражают благодарность Институту Арктики и Антарктики за помощь в организации полевых работ.

Цитирование: Поляков В.И., Абакумов Е.В., Лахтионова А.А., Мавлюдов Б.Р. Анализ полидисперсности органоминеральных компонентов криоконита на ледниковой поверхности архипелага Шпицберген // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2022. (115). № 2. С. 58-77. Doi: 10.26110/ARCTIC.2022.115.2.004

Original article

ANALYSIS OF THE POLYDISPERSITY OF ORGANOMINERAL COMPONENTS OF CRYOCONITE ON THE GLACIAL SURFACE OF THE SVALBARD ARCHIPELAGO

Vyacheslav I. Polyakov¹, Evgeny V. Abakumov², Alena A. Lakhtionova³, Bulat R. Mavlyudov⁴

^{1,2,3}Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

⁴Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

¹slavon6985@gmail.com

²e_abakumov@mail.ru

³lakhtionova.alena@gmail.com

⁴mavlyudov@igras.ru

Abstract. The formation of cryoconite is caused by the accumulation of black carbon particles and mineral deposits on the surface of glaciers. The accumulation of cryoconite contributes to the appearance of a strong light-absorbing effect, which leads, along with other factors (climate change, anthropogenic activity), to active deglaciation in mountainous and polar regions around the world. The paper presents the results of the analysis of polydispersity, physicochemical and chemical parameters

of organomineral deposits extracted from cryoconite, as well as soil-like bodies formed on the surface of a number of glaciers in the vicinity of the settlement of Barentsburg, Svalbard. Cryoconite in dead wells and in glacier fissures accumulates a significant amount of organic carbon compared to cryoconite that forms on the surface of a glacier. As a result of the analysis of the polydispersity of organomineral deposits, it was found that fine sand, coarse dust, and up to 30% of silt are accumulated. The accumulation of coarse dust and silt is predominantly atmospheric in nature, larger particles are of local origin.

Keywords: cryoconite, soil-like bodies, polydispersity, Svalbard Archipelago, Arctic.

Acknowledgments: This work was supported by Russian Foundation for Basic Research, project No 19-05-50107. The authors express their gratitude to the Institute of the Arctic and Antarctic for their help in organizing the field work.

Citation: V.I. Polyakov, E.V. Abakumov., A.A. Lakhtionova, B.R. Mavlyudov. Analysis of the polydispersity of organomineral components of cryoconite on the glacial surface of the Svalbard Archipelago // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2022. (115). № 2. P. 58-77. Doi: 10.26110/ARCTIC.2022.115.2.004

Введение

Арктика является наиболее уязвимым биомом в мире, в конце XIX века были получены данные, свидетельствующие о загрязнении ледового покрова Арктики частицами, приносимыми воздушными массами из бореальных и суббореальных широт [1]. Впервые в 1950-х годах военные летчики США наблюдали слои загрязняющих веществ в арктических экосистемах [2]. Позже было обнаружено, что это была так называемая «арктическая дымка» («arctic haze»), которая состоит из пепла, пыли и сульфатсодержащих соединений, выбрасываемых промышленными комплексами, расположенными в Евразии и переносимыми в Арктику [3-4]. Многие авторы считают светопоглощающие аэрозоли важнейшим фактором, приводящим к быстрому таянию арктических снегов и льдов [5-8]. В исследованиях светопоглощающих аэрозолей, вызывающих изменения арктического климата, чаще всего упоминается черный углерод (ЧУ). Clarke и Noone [8] считают, что накопление черного углерода и органических минеральных отложений вызывает потемнение поверхностей, которые в свою очередь начинают поглощать больше солнечной радиации. Это приводит к нагреву нижних слоев атмосферы и увеличению температуры в полярных и горных областях. ЧУ является наиболее сильно поглощаю-

щим свет компонентом твердых частиц (ТЧ) и образуется при неполном сгорании ископаемого топлива, биотоплива и биомассы [9]. Под этим термином понимаются климатообразующие вещества, находящиеся в атмосфере в течение короткого промежутка времени — от нескольких дней до нескольких лет [10-12]. ЧУ и органоминеральные отложения, попадая на снежно-ледяной покров, приводят к таянию льда, это вызвано их нагреванием и увеличением количества поглощаемой солнечной энергии. Изменения альбедо поверхности из-за атмосферных отложений и особенно ЧУ являются важным фактором ускорения таяния ледников [13-14]. Это чрезвычайно важно для полярных и горных районов в условиях дегляциации и изменения климата на планете. Величина альбедо на заснеженных поверхностях в незагрязненных условиях составляет 80-85% от всех поступающих солнечных лучей. Когда эти поверхности загрязнены, отражается 30-50% [13-17]. За последние десятилетия площадь распространения и объем арктических льдов неуклонно сокращается [18]. Исследования показывают, что нынешнее сокращение ледников беспрецедентно для Арктики и что темпы их деградации очень высоки [7]. Многочисленные международные и межправительственные органы и агентства, включая Программу Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП), Всемирную метеорологическую организацию (ВМО), Конвенцию о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния и Арктический совет, определили ЧУ как вещество, которое оказывает существенное влияние на изменение климата [7, 9].

Климатические исследования в Арктике показывают, что при нынешнем уровне повышения температуры Северный Ледовитый океан может оставаться свободным ото льда в течение всего лета в течение ближайших 30-40 лет [19-21]. Глобальные изменения климата приводят к деградации ледников, что сопровождается активной трансформацией рельефа и выносом больших объемов обломочного материала с суши в морские бассейны. Концентрация аэрозолей в атмосфере Арктики сильно меняется в течение года [22]. Период с максимальной концентрацией аэрозолей в атмосфере приходится на весну, когда повышенные уровни аэрозолей и газовых примесей во многом определяют полидисперсность компонентов атмосферных микроэлементов. Микрочастицы состоят в основном из сульфатов и органических компонентов, а также золы (тонкодисперсный остаток сгорания органических компонентов) и других микроэлементов, образующихся в результате антропогенного воздействия. Высокая весенняя концентрация аэрозолей является результатом сжигания биомассы [23].

Перенос насыщенных аэрозолями воздушных масс из умеренных широт в высокие в периоды арктической дымки сопровождается малым количеством осадков (2-3 мм за 10 дней), тогда как летом выпадает большее

количество осадков (в среднем 7–8 мм за 10 дней) [20]. Зимой осадки постепенно уменьшают накопление микрочастиц. Летом увеличение количества жидких осадков также влияет на уменьшение объема аэрозоля и способствует образованию и росту новых микрочастиц [20].

Во время арктической дымки количество осадков минимально, что приводит к эффективному переносу аэрозолей и микрочастиц. Годовая и средняя концентрации черного углерода на Шпицбергене в районе станции Цеппелин с 1998 по 2010 г. составляли 39 и 27 $\text{нг}/\text{м}^3$ соответственно [20, 24], тогда как среднемесячная концентрация колебалась от максимума 80 $\text{нг}/\text{м}^3$ в феврале/марте (период арктической дымки) до минимума 0–10 $\text{нг}/\text{м}^3$ с июня по сентябрь (период с обильными осадками) [24]. Помимо атмосферных аэрозолей в накоплении криоконита участвуют органиноминеральные осадки локального происхождения. В горных и арктических природных средах такие частицы формируются преимущественно механическим путем в ходе разрушения горных пород. Накопление таких частиц происходит в трещинах, отмерших колодцах (формируется из трещины в леднике при попадании в нее воды и органиноминеральных осадков с поверхности ледника и стаканов криоконита), а также муравьиных кучах (моренный материал, возвышающийся над поверхностью ледника) [25].

Работа Hegg et al. [26] также свидетельствует о более высоких концентрациях частиц ЧУ в атмосфере Арктики в весеннее время. В районе Северного полюса ($5 \pm 2 \text{ нг}/\text{м}^3$), в арктической Канаде ($8 \pm 3 \text{ нг}/\text{м}^3$), а также в Гренландии ($4 \pm 2 \text{ нг}/\text{м}^3$) эти концентрации заметно ниже полученных в районе архипелага Шпицберген. Hegg et al. [26] также отмечают, что самые высокие концентрации были получены в арктическом секторе Восточной Евразии ($21 \pm 30 \text{ нг}/\text{м}^3$), что коррелирует с данными по архипелагу Шпицберген и подтверждает мысль о том, что один из глобальных источников ЧУ в Арктике – это последствия лесных пожаров в Азии. В связи с этим целью работы было изучение полидисперсности криоконита формирующихся на поверхности и сносимых в трещины и отмершие ледниковые колодцы различных ледников Западного Шпицбергена. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: 1 – охарактеризовать полидисперсность криоконита на различных ледниках и почвоподобных телах перигляциальной зоны Западного Шпицбергена; 2 – проанализировать полученные данные по полидисперсности органиноминеральных отложений, аккумулирующихся в скоплениях криоконита, муравьиных кучах и почвоподобных телах.

Материалы и методы

Исследование криоконита проводилось на ледниках архипелага Шпицберген, его юго-западной береговой линии, район между $77^{\circ}91'$ и $78^{\circ}10'$

с.ш. и 14°00' и 14°85' з.д. Участки исследований расположены в прибрежной зоне Гренфьорда и прилегающей к нему территории (рис.1). Климат данной территории субарктический, среднегодовая температура -5,8 °С. Средняя температура самого теплого месяца (июля) - (8 °С), самого холодного (февраля) – (-18 °С). Глубина активного слоя почв составляет от 1,8 до 2,5 м. Толщина снежного покрова колеблется до 1 м. Среднегодовое количество осадков – 563 мм, количество осадков летом – 87 мм [18].

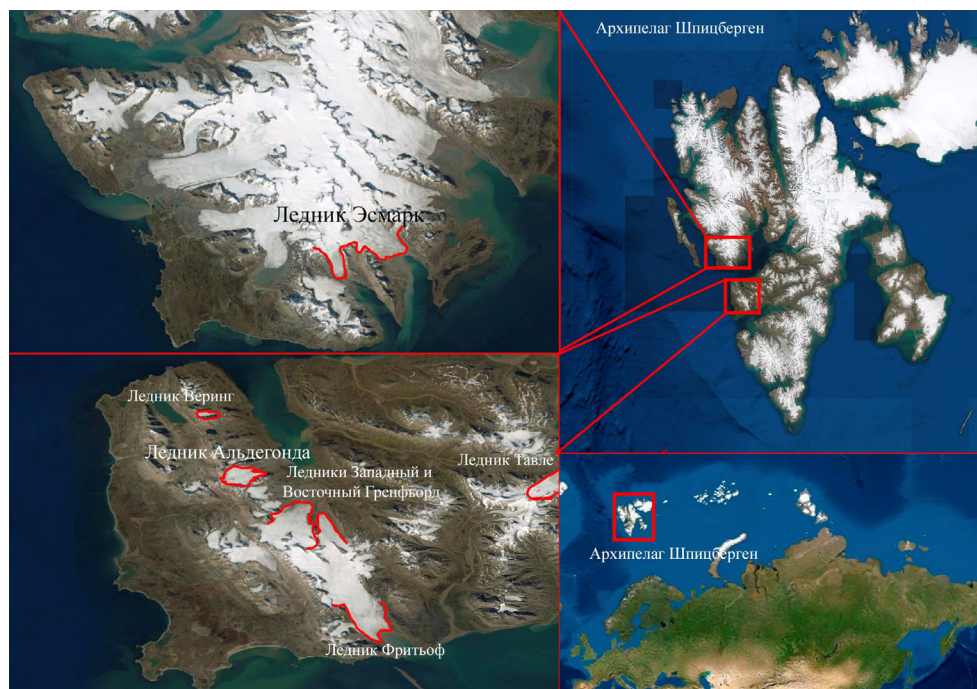


Рис. 1. Регион исследования. Архипелаг Шпицберген

Ледник Гренфьорд (Западный Шпицберген) образован двумя ледниками - Западным Гренфьордом и Восточным Гренфьордом, которые занимают две соседние долины, оканчивающиеся посреди залива Гренфьорд, южного притока Исфьорда – крупнейшего фьорда Западного Шпицбергена. Распространение растений на архипелаге неоднородно. Растительность относится к тундровому типу, где преобладают представители *Salix polaris*, *Cerastium alpinum*, *Luzula confusa*, *Saxifraga cespitosa*, *Trisetum spicatum*. Рельеф архипелага среднегорный с широкими долинами, осложненными типичными морскими (террасы), речными (террасы, дельты, поймы) и криогенными формами (пинго, мерзлотные полигоны, ледяные жилы) [27-29].

Пробы отложений из скоплений криоконита и муравьиных куч, сформировавшихся на месте отмерших ледниковых колодцев и трещин, рас-

положенных на поверхности ледников Западного Шпицбергена (см. таблица 1).

Таблица 1. Описание исследуемых органоминеральных отложений из исследованных криоконитов

№ образца	Описание места отбора	Координаты	Высота отбора
1-Ш	Восточный Гренфьорд, криоконит по трещине	77.92039/ 14.33532	320
2-Ш	Восточный Гренфьорд, криоконит по мертвому колодцу	77.90400 / 14.35451	239
3-Ш	Западный Гренфьорд, криоконит	77.93459 /14.24975	102
4-Ш	Грунт, накопившийся в результате движения ледника Альдегонда	77.98897 /14.16943	29
5-Ш	Перевал Западный Фритьоф, криоконит по трещине	77.88686 / 14.22591	575
6-Ш	Ледник Эсмарка, криоконит в трещине	78.32172 /13.58408	179
7-Ш	Моренный комплекс левой ветви ледника Тавле, моренно-озерный грунт	77.97983 / 15.94749	146
8-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит	77.98202 / 14.08999	176
9-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит по трещине	77.97716 / 14.06104	239
10-Ш	Ледник Тавле, криоконит	77.96955 / 15.11371	327
11-Ш	Западный Гренфьорд, криоконит	77.93285 / 14.24701	123
12-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит по трещине	77.98175 / 14.08704	186
13-Ш	Ледник Эсмарк, криоконит	78.32121/ 13.89433	130
14-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит по трещине	77.97226 /14.07392	249
15-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит на краю льда	77.97526 /14.07692	190
16-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит на краю льда	77.98328 / 14.09999	140
17-Ш	Восточный Гренфьорд, криоконит по трещине	77.89848 / 14.34147	317
18-Ш	Западный Гренфьорд, криоконит	77.91855 / 14.23447	246
19-Ш	Ледник Эсмарк, криоконит	78.31848 / 13.84912	180
20-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит по мертвому колодцу	77.97263 / 14.05516	255
21-Ш	Фритьоф, озерные отложения	77.86959 / 14.34951	304
22-Ш	Ледник Эсмарка, криоконит	78.30940 / 13.93309	48
23-Ш	Фритьоф, криоконит в трещине	77.87988 / 14.35806	385
24-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит по трещине	77.98056 / 14.07659	210

Продолжение таблицы 1

№ образца	Описание места отбора	Координаты	Высота отбора
25-Ш	Ледник Эсмарка, криоконит по трещине	78.31387 / 13.93075	52
26-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит по отмершему колодцу	77.96912 / 14.09359	245
27-Ш	Ледник Эсмарка, криоконит	78.31769 / 13.86366	165
28-Ш	Ледник Тавле, криоконит	77.97508 / 15.12987	289
29-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит по трещине	77.97496 / 14.05914	247
30-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит	77.96427 / 14.07565	314
31-Ш	Ледник Эсмарка, криоконит	78.31812 / 13.85379	174
32-Ш	Ледник Эсмарка, грунт у края ледника	78.30669 / 13.92934	29
33-Ш	Ледник Тавле, криоконит	77.97755 / 15.14730	252
34-Ш	Ледник Альдегонда, криоконит по трещине	77.96857 / 14.08003	276
35-Ш	Ледник Вёринг, криоконит по трещине	78.04177 / 13.94469	276
36-Ш	Западный Гренфьорд, криоконит	77.92401 / 14.23852	212
37-Ш	Ледник Альдегонда, озерные отложения у края льда	77.98335 / 14.11423	175
38-Ш	Ледник Альдегонда, почвоподобное тело у границы ледника	77.98535 / 14.11623	134

Методы анализа

Для анализа химических и физико-химических параметров криоконита и почвоподобных тел все образцы были растерты в ступке и просеяны через сито с размером ячейки 1 мм. Содержание органического углерода (С, %) в почве определяли методом Тюрина (мокрое сжигание). рН измеряли в водной суспензии в соотношения почва-вода 1:2,5. Гранулометрический состав почв был определен пипеточным методом (метод Качинского), суспензию готовили с добавлением в пробу пирофосфата натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$). Микробиологическую активность почв, базальное дыхание, определяли в условиях инкубационного лабораторного эксперимента [30]. Для статистической обработки информации были использованы: коэффициент корреляции Пирсона, а также кластерный анализ (Метод Марда).

Результаты и обсуждение

Химический состав исследованных образцов органоминеральных отложений из криоконита и почвоподобных тел различается в широком пределе (см. таблицу 2). Согласно полученным результатам, реакция рН

для органоминеральных веществ из криоконита имеет близкую к слабокислой реакцию среды и различается в пределе от кислой до слабокислой. Однако реакция рН для почвоподобных тел находится в относительно широком диапазоне от сильнокислой до нейтральной. Слабокислая реакция среды обусловлена местной геологической обстановкой. Высокий диапазон значений рН почвоподобных тел в приледниковой зоне может быть результатом переноса насыщенных водных растворов с поверхности ледника в приледниковую зону.

Таблица 1. Описание исследуемых органоминеральных отложений из исследованных криоконитов

№	рН H ₂ O	Базальное дыхание, мгСО ₂ /100 г*день-1	С, %	Гранулометрический состав					
				Крупный и средний песок (1-0.25 мм)	Мелкий песок (0.25-0.05 мм)	Крупная пыль (0.05-0.01 мм)	Средняя пыль (0.01-0.005 мм)	Мелкая пыль (0.005-0.001 мм)	Ил (< 0.001 мм)
1-Ш	6,20	38,50	1,36	10	27	31	13	7	12
2-Ш	6,08	38,50	1,69	3	32	45	2	8	10
3-Ш	5,14	60,50	1,25	1	35	42	9	4	9
4-Ш	6,39	19,25	0,35	3	53	26	2	3	13
5-Ш	5,54	27,50	1,86	3	28	39	15	4	11
6-Ш	5,48	27,50	1,36	3	39	42	4	2	10
7-Ш	4,13	22,00	1,19	1	20	34	14	8	23
8-Ш	5,98	27,50	1,03	9	28	32	10	9	12
9-Ш	6,13	49,50	0,69	5	19	56	6	4	10
10-Ш	5,78	49,50	1,80	7	29	43	7	4	10
11-Ш	5,91	22,00	1,14	5	32	42	7	5	9
12-Ш	5,89	44,00	0,97	1	24	51	1	13	10
13-Ш	6,65	30,25	1,03	13	28	41	5	3	10
14-Ш	5,95	44,00	1,91	1	22	58	6	3	10
15-Ш	6,48	27,50	0,53	2	27	38	15	8	10
16-Ш	5,96	38,50	2,47	1	30	49	5	5	10
17-Ш	5,45	27,50	1,14	5	31	15	34	4	11
18-Ш	5,18	24,75	1,30	4	37	42	6	3	8
19-Ш	5,30	27,50	0,92	7	27	51	5	3	7
20-Ш	5,58	27,34	1,12	2	24	53	7	4	10
21-Ш	7,10	28,29	0,50	1	15	41	16	11	16

Продолжение таблицы 1

№	рН H ₂ O	Базальное дыхание, мгСО ₂ /100 г*день ⁻¹	С, %	Гранулометрический состав					
				Крупный и средний песок (1-0.25 мм)	Мелкий песок (0.25-0.05 мм)	Крупная пыль (0.05-0.01 мм)	Средняя пыль (0.01-0.005 мм)	Мелкая пыль (0.005-0.001 мм)	Ил (< 0.001 мм)
22-Ш	6,40	31,37	0,45	1	15	23	12	19	30
23-Ш	6,80	31,43	1,79	2	29	27	28	4	10
24-Ш	6,68	44,01	1,00	2	35	40	4	7	12
25-Ш	6,86	31,43	0,39	1	30	55	8	2	5
26-Ш	5,95	75,43	1,00	1	30	53	7	3	6
27-Ш	5,21	62,86	1,34	2	25	2	58	3	10
28-Ш	5,76	44,00	1,40	6	42	32	12	3	5
29-Ш	6,38	88,00	1,06	9	44	18	18	5	6
30-Ш	5,75	94,29	1,17	2	32	50	7	3	6
31-Ш	5,14	56,35	1,19	3	37	45	5	3	7
32-Ш	6,33	44,01	0,47	5	31	40	15	1	8
33-Ш	5,93	25,14	0,80	2	32	38	14	7	7
34-Ш	5,30	40,86	1,53	1	29	55	6	2	7
35-Ш	5,04	88,01	0,97	5	28	48	6	5	8
36-Ш	5,57	62,86	0,69	5	33	44	7	3	8
37-Ш	6,18	72,29	0,47	2	56	28	3	2	9
38-Ш	5,30	31,43	1,47	4	27	47	8	7	7

Микробиологическая активность органоминеральных веществ в криоконите характеризуется относительно низкой величиной, которая сравнима с криогенными почвами (от 22 до 143 мг СО₂/100г*день⁻¹) и органоминеральными отложениями из криоконита (от 6 до 48 мг СО₂/100г*день⁻¹) на ледниках г. Эльбрус [31-32]. Несколько повышенные значения микробиологической активности органоминеральных веществ в криоконите Шпицбергена по сравнению с Эльбрусом, видимо, связаны с наличием птичьих базаров на скалах вокруг многих ледников Шпицбергена. Почвоподобные тела вблизи приледниковых озер также характеризуются относительно низкой микробиологической активностью. В целом, данные величины характерны для органоминеральных веществ, накапливающихся в стаканах криоконита. Низкая микробиологическая активность обусловлена постоянными низкими температурами льда, а также длительными низкими температурами атмосферного воздуха на архипелаге Шпицберген. Согласно коэффициенту корреляции Пирсона установлена

устойчивая положительная связь ($r=0,89$) между микробиологической активностью и содержанием органического углерода. Содержание углерода варьирует в пределах от 0,35 до 2,47 %, что немного выше, чем в криоконите с ледников Эльбруса (от 0,05 до 1,41 %), и значительно ниже, чем в криогенных почвах (от 3,3 до 49,6 %) [31-32]. Наибольшее содержание углерода отмечается в криоконите, в отмерших колодцах и в трещинах на ледниках, среднее значение содержания углерода составляет 1,12 %. Однако, в условиях дегляциации ледяного покрова в Арктике, органическое вещество, накапливающееся в мертвых колодцах, трещинах и на поверхности ледников может поступить в перигляциальную зону и существенно повлиять на трансформацию ландшафта, создавая условия для первичного почвообразования совместно с рыхлыми продуктами морены.

Одним из фундаментальных свойств органоминеральных отложений является их полидисперсность, определяемая по соотношению разномасштабных фракций механических элементов [33-34]. Одним из методов определения полидисперсности является анализ гранулометрического состава. Согласно анализу результатов гранулометрического состава было выявлено, что в образцах преобладают фракции крупной пыли и мелкого песка. Высокая доля мелкого песка может свидетельствовать о локальном характере накопления данной фракции. Однако накопление крупной пыли может иметь как локальное происхождение, также аккумуляроваться в результате атмосферного переноса. Также отмечается относительно большое содержание ила до 30%. Накопление тонкодисперсных частиц ила в большей степени является результатом атмосферного переноса и формирования арктической дымки над Арктикой, и некоторая доля обусловлена локальными условиями трансформации горных пород и ветровым переносом. Тонкодисперсная фракция играет особую роль в формировании почвоподобных тел, илистая фракция в большей степени влияет на гидрофизические свойства, почвенно-поглощающий комплекс по отношению к более крупным по размеру механическим частицам [35]. Наибольшее содержание ила было зафиксировано в образцах из почвоподобных тел вблизи ледников, это говорит о том, что сюда попадает как сток органоминеральных отложений с ледника, так и атмосферное накопление. Накопление крупной фракции песка было установлено преимущественно в трещинах на ледниках, и связано с локальным перераспределением физически разрушенных горных пород. В пробах почвоподобных тел распределение различных фракций отличается от криоконита с ледников на г. Эльбрус, так в криоконите на леднике Шхельда преобладают фракции песка [31]. Это может указывать на то, что почвоподобные тела формируются в результате деградации ледяного покрова и переноса органоминеральных частиц с ледников в перигляциальную зону. Согласно данным кластерного анализа по содержанию углерода было выявлено, что из изученных образ-

цов с разных ледников можно выделить три однородные группы (Метод Варда), которые различаются по особенностям накопления на ледниках (Рис. 2). В первую группу входят изученные образцы криоконита, накапливающегося в отмерших колодцах и трещинах с ледника Альдегонда, почвоподобное тело, формирующееся в результате смыва с ледника Альдегонда, а также криоконит в трещине с ледника Фритьоф. Во вторую группу входят образцы криоконита с ледника Эсмарк, а также почвоподобные тела вблизи ледников Фритьоф и Альдегонда, в третью группу входит криоконит, накапливающийся на поверхности ледника Альдегонда, Вёринг, Тавле, Западный и Восточный Гренфьерд. Таким образом, мы можем говорить о том, что процесс накопления органического материала различается в зависимости от рельефа ледника и орнитогенного влияния. Так, криоконит, накапливающийся в колодцах и трещинах ледника, аккумулируют в себе больше углерода по отношению к криокониту, который формируется на поверхности ледников. Это связано с неоднородностью поверхности ледяного покрова и высоким разнообразием химического состава атмосферных аэрозолей. Возможно, также влияет и количество накопленного криоконитом материала, самое большое количество которого аккумулируется в отмерших колодцах и трещинах. По остальным изученным параметрам (рН, базальное дыхание, гранулометрический состав) четкого деления на группы не наблюдается.

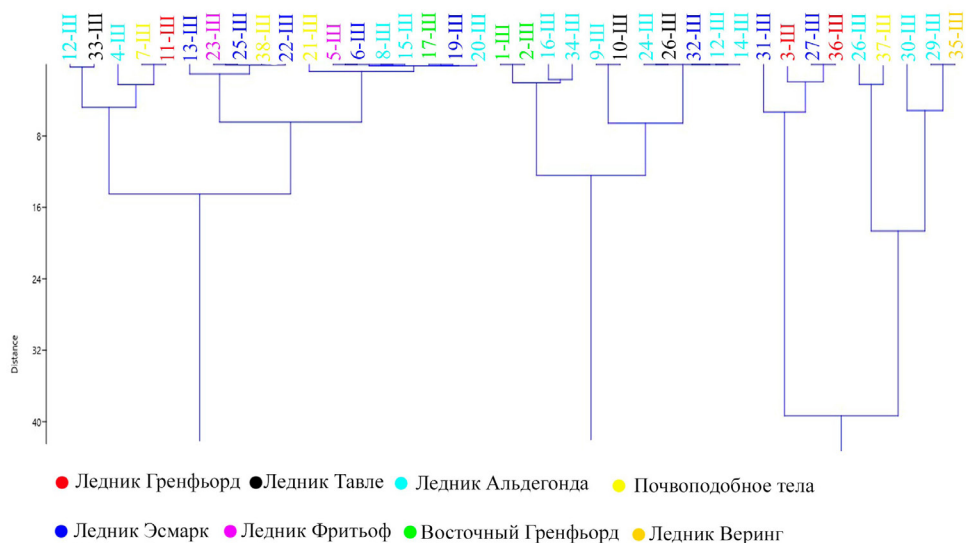


Рисунок 2. Кластерный анализ. Метод Варда

В изученных муравьиных кучах накапливается существенное количество органического углерода, что связано, скорее всего с деятельностью микроорганизмов, выпадением атмосферных аэрозолей, а также смыва

вом органоминеральных отложений с ледника. В условиях дегляциации и абляции данное органическое вещество и минеральные компоненты будут поступать в уязвимую по отношению к экзогенным процессам перигляциальную зону, что повлечет за собой активную трансформацию почвенного покрова и геохимии ландшафта в целом. Органоминеральные отложения в муравьиных кучах и скоплениях криоконита являются источником не только органического материала и минеральных частиц, а также и различных поллютантов (тяжелые металлы, полиароматические углеводороды, радионуклиды) [31]. Таким образом, формирование скоплений криоконита на поверхности ледников представляет собой один из важнейших элементов почвообразования в перигляциальной зоне, способствующий ее колонизации растительностью, а также трансформации ландшафта.

Заключение

На поверхности ледников архипелага Шпицберген происходит накопление минеральных частиц и органического вещества, это обусловлено разнообразием условий аккумуляции органоминеральных отложений на поверхности, колодцах и в трещинах ледникового покрова, и химических и физико-химических компонентов атмосферных аэрозолей. Анализ органоминеральных отложений в муравьиных кучах криоконита и почвоподобных телах приледниковой зоны показал, что в изученные объекты характеризуются слабокислой реакцией среды, содержание углерода варьирует от 0,35 до 2,47 %. Согласно кластерному анализу, было выявлено, что наибольшее содержание углерода характерно для органоминеральных отложений, аккумулирующихся в колодцах и трещинах на ледниках. Исходя из данных анализа полдисперсности криоконита, можно сделать вывод о том, что в составе органоминеральных отложений преобладает мелкий песок и крупная пыль с относительно высоким до 30% содержанием тонкодисперсного ила. Параметры микробиологической активности почв положительно коррелируют с содержанием углерода в органоминеральных отложениях, при этом уровень активности сохраняется относительно низким. Низкие темпы трансформации органического вещества связаны с постоянными низкими положительными и отрицательными температурами на поверхности ледников. Параметры полидисперсности определяются локальными и атмосферными аспектами аккумуляции криоконита. Все это влияет на формы и размеры механических частиц криоконита, а также на особенности накопления органоминеральных отложений на поверхности ледника в колодцах, стаканах, а также муравьиных кучах. Фракция крупного песка накапливается в трещинах ледников, а фракция ила преимущественно вблизи ледника в составе почвоподобных тел, что свидетельствует о транслокации веществ.

Список источников

1. Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhart J. F., Jefferson A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output // *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, № 10, P. 669-693.
2. Mitchell J. M. Visual range in the polar regions with particular reference to the Alaskan Arctic // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1957, № 17, P. 195-211.
3. Shaw G. E. Evidence for a central Eurasian source area of Arctic haze in Alaska. *Nature* // 1983. № 299, P. 815-818.
4. Shaw G. E. The Arctic haze phenomenon // *Bull. Am. Met. Soc.*, 1995, № 76, P. 2403-2413.
5. Dumont M., Brun E., Picard G. Contribution of light-absorbing impurities in snow to Greenland's darkening since 2009 // *Nat. Geosci.*, 2014, № 7(7), P. 509-512.
6. Flanner M., Zender C., Randerson J., Rasch P. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow // *J. Geophys. Res.*, 2007, № 112:D11202.
7. AMAP. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Norway: Oslo, 2015. 116 p.
8. Clarke A. D., Noone K. J. Soot in the Arctic snowpack: a cause for perturbations in radiative transfer // *Atmos. Environ.*, 1985, № 19, P. 2045-2053.
9. Report to Congress on Black Carbon. Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010 / Sasser E (Ed.)// –USA, 2012. 388 p.
10. Bond T. C., Doherty S. J., Fahey D. W., Forster P. M., Berntsen T., DeAngelo B. J., Flanner M. G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P. K., Sarofim M. C., Schultz M. G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S. K., Hopke P. K., Jacobson M. Z., Kaiser J. W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J. P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S. G., Zender C. S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, № 118(11), P. 5380-5552.
11. Виноградова А. А., Смирнов Н. С., Коротков В. Н. Аномальные пожары 2010 и 2012 годов в России и поступление черного углерода в Арктику // *Оптика атмосферы и океана*, 2016, № 29(6), С. 482-487.
12. Bachmann J. Black Carbon: A Science/Policy Primer. Vision air consulting, LLC // PEW Center on Global Climate Change, 2009. 47 p.
13. Горчакова И. А. Радиационное и температурное воздействие дымового аэрозоля в Московской области при летних пожарах 2010 г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 2012, № 48(5), С. 558-565.
14. Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds // *Journal of Atmospheric Sciences*, 1977, № 34, P. 1149-1152.
15. Bond T. C., Zarzycki C., Flanner M. G., Koch D. M. Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse // *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, № 11, P. 1505-1525.
16. Jacobson M. Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols // *Nature*, 2001, № 409, P. 695-697.
17. Макаров В. И., Попова С. А. Многолетние исследования динамики концен-

- трации черного (элементарного) углерода в атмосфере Новосибирской области // *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2016, № 4(2), С. 141-144.
18. Antsiferova A. R., Mokrotovarova O. I., Siekkinen E.D. Climate change of the Svalbard Archipelago. Climatic features of the winter 2013-2014 // *Integrated Investigations of the Environment of the Svalbard Archipelago and the Adjacent Continental Shelf Area*. 2014, № 12, P. 16-21.
 19. Serreze M. C., Holland M. M., Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover // *Science*, 2007, № 315, P. 1533-1536.
 20. Tunved P., Strom J., Krejci R. Arctic aerosol life cycle: linking aerosol size distributions observed between 2000 and 2010 with air mass transport and precipitation at Zeppelin station, Ny-Alesund, Svalbard // *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, № 13, P. 3643-3660.
 21. Wang M. Y., Overland J. E. A sea ice free summer Arctic within 30 years? // *Geophys. Res. Lett.*, 2009, № 36:L18501.
 22. Strom J., Umegard J., Torseth K., Tunved P., Hansson H. C., Holmen K., Wismann V., Herber A., Konig-Langlo G. One year of particle size distribution and aerosol chemical composition measurements at the Zeppelin Station, Svalbard, March 2000–March 2001 // *Phys. Chem. Earth.*, 2001, № 28, P. 1181-1190.
 23. Warneke C., Bahreini R., Brioude J., Brock C. A., de Gouw J. A., Fahey D. W., Froyd K. D., Holloway J. S., Middlebrook A., Miller L., Montzka S., Murphy D. M., Peischl J., Ryerson T. B., Schwarz J. P., Spackman J. R., Veres P. Biomass burning in Siberia and Kazakhstan as an important source for haze over the Alaskan Arctic in April 2008 // *Geophys. Res. Lett.*, 2009, № 36:L02813.
 24. Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998–2007 // *Geophysical Research Letters*, 2009, № 36:L02809.
 25. Основы гляциологии. / Войтковский К.Ф. // М.: Наука, 1999. 239 с.
 26. Hegg D. A., Warren S. G., Grenfell T. C., Doherty S. J., Clarke A. D. Sources of light absorbing aerosol in arctic snow and their seasonal variation // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, № 10, P. 10923-10938
 27. Szymański W., Wojtuń B., Stolarczyk M., Siwek J., Waścińska J. Organic carbon and nutrients (N, P) in surface soil horizons in a non-glaciated catchment, SW Spitsbergen // *Polish Polar Research*, 2016, № 37(1), P. 49-66.
 28. Pengerud A., Dignac M-F., Certini G., Strand L. T., Forte C., Rasse D. P. Soil organic matter molecular composition and state of decomposition in three locations of the European Arctic // *Biogeochemistry Springer*. 2017, № 135 (4).
 29. Szymański W. Chemistry and spectroscopic properties of surface horizons of Arctic soils under different types of tundra vegetation – A case study from the Fuglebergsletta coastal plain (SW Spitsbergen) // *Catena*, 2017, № 156, P. 325-337
 30. Assessment methods for soil carbon. / Lal R, Kimble JM, Follet RF, Stewart BA // *Lewis Publishers*. - USA, 2001. 676 p.
 31. Kushnov I., Abakumov E., Tembotov R., Polyakov V. Geochemistry of cryoconite and soils in the Central Caucasus region and its environmental implications // *Journal of Mountain Science*, 2021. № 18(12).
 32. Polyakov V. I., Orlova K. S., Abakumov E. V. Soils of the Lena River Delta, Yakutia, Russia: Diversity, Characteristics and Humic Acids Molecular Composition // *Polarforschung*, 2019, № 88 (2), P. 135-150.

33. Мухаметова Н.В., Абакумов Е.В., Рюмин А.Г. Гранулометрический состав антарктических почв по данным седиментометрии и лазерной дифрактометрии // *Агрофизика*, 2013, № 3(13), С. 1-6.
34. Максимова Е.Ю., Быкова Г.С., Абакумов Е.В. Характеристика физических свойств послепожарных почв // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2014, № 15(5), С. 51-57.
35. Макаров В.Н. Торговкин Н.В. Загрязнение атмосферы города Якутска взвешенными веществами // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, 2020, № 25(1), С. 43-50.

References

1. Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhart J. F., Jefferson A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output // *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, № 10, P. 669-693.
2. Mitchell J. M. Visual range in the polar regions with particular reference to the Alaskan Arctic // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1957, №17, P. 195-211.
3. Shaw G. E. Evidence for a central Eurasian source area of Arctic haze in Alaska. *Nature* // 1983. № 299, P. 815-818.
4. Shaw G. E. The Arctic haze phenomenon // *Bull. Am. Met. Soc.*, 1995, № 76, P. 2403-2413.
5. Dumont M., Brun E., Picard G. Contribution of light-absorbing impurities in snow to Greenland's darkening since 2009 // *Nat. Geosci.*, 2014, № 7(7), P. 509-512.
6. Flanner M., Zender C., Randerson J., Rasch P. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow // *J. Geophys. Res.*, 2007, № 112:D11202.
7. AMAP. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Norway: Oslo, 2015. 116 p.
8. Clarke A. D., Noone K. J. Soot in the Arctic snowpack: a cause for perturbations in radiative transfer // *Atmos. Environ.*, 1985, № 19, P. 2045-2053.
9. Report to Congress on Black Carbon. Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010 / Sasser E (Ed.)// –USA, 2012. 388 p.
10. Bond T. C., Doherty S. J., Fahey D. W., Forster P. M., Berntsen T., DeAngelo B. J., Flanner M. G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P. K., Sarofim M. C., Schultz M. G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S. K., Hopke P. K., Jacobson M. Z., Kaiser J. W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J. P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S. G., Zender C. S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, № 118(11), P. 5380-5552.
11. Vinogradova A. A., Smirnov N. S., Korotkov V. N. Anomalous fires in 2010 and 2012 in Russia and the influx of black carbon into the Arctic // *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2016, № 29(6), P. 482-487.
12. Bachmann J. Black Carbon: A Science/Policy Primer. Vision air consulting, LLC // PEW Center on Global Climate Change, 2009. 47 p.

13. Gorchakova I. A. Radiation and temperature effects of smoke aerosol in the Moscow region during summer fires in 2010 // *Izv. RAN. Physics of the Atmosphere and Ocean*, 2012, № 48(5), P. 558-565.
14. Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds // *Journal of Atmospheric Sciences*, 1977, № 34, P. 1149-1152.
15. Bond T. C., Zarzycki C., Flanner M. G., Koch D. M. Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse // *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, № 11, P. 1505-1525.
16. Jacobson M. Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols // *Nature*, 2001, № 409, P. 695-697.
17. Makarov V. I., Popova S. A. Long-term studies of the dynamics of the concentration of black (elemental) carbon in the atmosphere of the Novosibirsk region // *Interexpo Geo-Siberia*, 2016, № 4(2), P. 141-144.
18. Antsiferova A. R., Mokrotovarova O. I., Siekkinen E.D. Climate change of the Svalbard Archipelago. Climatic features of the winter 2013-2014 // *Integrated Investigations of the Environment of the Svalbard Archipelago and the Adjacent Continental Shelf Area*. 2014, № 12, P. 16-21.
19. Serreze M. C., Holland M. M., Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover // *Science*, 2007, № 315, P. 1533-1536.
20. Tunved P., Strom J., Krejci R. Arctic aerosol life cycle: linking aerosol size distributions observed between 2000 and 2010 with air mass transport and precipitation at Zeppelin station, Ny-Alesund, Svalbard // *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, № 13, P. 3643-3660.
21. Wang M. Y., Overland J. E. A sea ice free summer Arctic within 30 years? // *Geophys. Res. Lett.*, 2009, № 36:L18501.
22. Strom J., Umegard J., Torseth K., Tunved P., Hansson H. C., Holmen K., Wismann V., Herber A., Konig-Langlo G. One year of particle size distribution and aerosol chemical composition measurements at the Zeppelin Station, Svalbard, March 2000–March 2001 // *Phys. Chem. Earth.*, 2001, № 28, P. 1181-1190.
23. Warneke C., Bahreini R., Brioude J., Brock C. A., de Gouw J. A., Fahey D. W., Froyd K. D., Holloway J. S., Middlebrook A., Miller L., Montzka S., Murphy D. M., Peischl J., Ryerson T. B., Schwarz J. P., Spackman J. R., Veres P. Biomass burning in Siberia and Kazakhstan as an important source for haze over the Alaskan Arctic in April 2008 // *Geophys. Res. Lett.*, 2009, № 36:L02813.
24. Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998–2007 // *Geophysical Research Letters*, 2009, № 36:L02809.
25. Fundamentals of glaciology. / Voitkovsky K.F. // Moscow: Nauka, 1999. 239 p.
26. Hegg D. A., Warren S. G., Grenfell T. C., Doherty S. J., Clarke A. D. Sources of light absorbing aerosol in arctic snow and their seasonal variation // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, № 10, P. 10923-10938
27. Szymański W., Wojtuń B., Stolarczyk M., Siwek J., Waścińska J. Organic carbon and nutrients (N, P) in surface soil horizons in a non-glaciated catchment, SW Spitsbergen // *Polish Polar Research*, 2016, № 37(1), P. 49–66.
28. Pengerud A., Dignac M-F., Certini G., Strand L. T., Forte C., Rasse D. P. Soil organic matter molecular composition and state of decomposition in three locations of the European Arctic // *Biogeochemistry Springer*. 2017, № 135 (4).

29. Szymański W. Chemistry and spectroscopic properties of surface horizons of Arctic soils under different types of tundra vegetation – A case study from the Fuglebergsletta coastal plain (SW Spitsbergen) // *Catena*, 2017, № 156, P. 325–337
30. Assessment methods for soil carbon. / Lal R, Kimble JM, Follet RF, Stewart BA // Lewis Publishers. - USA, 2001. 676 p.
31. Kushnov I., Abakumov E., Tembotov R., Polyakov V. Geochemistry of cryoconite and soils in the Central Caucasus region and its environmental implications // *Journal of Mountain Science*, 2021. № 18(12).
32. Polyakov V. I., Orlova K. S., Abakumov E. V. Soils of the Lena River Delta, Yakutia, Russia: Diversity, Characteristics and Humic Acids Molecular Composition // *Polarforschung*, 2019, № 88 (2), P. 135-150.
33. Mukhametova N.V., Abakumov E.V., Ryumin A.G. Granulometric composition of Antarctic soils according to sedimentometry and laser diffractometry data // *Agrophysics*, 2013, № 3(13), P. 1-6.
34. Maksimova E.Yu., Bykova G.S., Abakumov E.V. Characteristics of the physical properties of post-fire soils // *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, № 15(5), P. 51-57.
35. Makarov V.N. Torgovkin N.V. Pollution of the atmosphere of the city of Yakutsk with suspended solids // *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*, 2020, № 25(1), P. 43-50.

Сведения об авторах

Поляков Вячеслав Игоревич, 1993 г.р., окончил Санкт-Петербургский государственный аграрный университет в 2021 году. С 2015 года инженер кафедры прикладной экологии СПбГУ. Область научных интересов: экология почв, взаимодействие системы почва – атмосфера, экосистемные услуги, экотоксикологическое состояние почвенного покрова крупных городов России, биоразнообразие, conservation biology, биогеохимические циклы питательных веществ, регуляция экосистемных процессов, рекреация и экотуризм, ремедиация экосистем, секвестрация углерода, трансформация ландшафтов в условиях изменения климата, формирование карбоновых полигонов в России.

Абакумов Евгений Васильевич, 1978 г.р., доктор биологических наук, профессор, профессор РАН (отделение сельскохозяйственных наук), заведующий кафедрой прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов: почвы Арктики и Антарктики, природное органическое вещество, экотоксикология, прикладная экология.

Лахтионова Алена Александровна, 1990 г.р., аспирант кафедры прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов: экологическое состояние водной и почвенной сред, биоразнообразие, биоиндикация, биогеография, рациональное природопользование, устойчивое развитие.

Мавлюдов Булат Рафаэлевич, 1951 г.р., кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела гляциологии Института географии РАН. Область научных интересов: гляциология, динамика ледников, баланс массы, гляциоспелеология, спелеогляциология.

Участие авторов

Поляков В.И. – концепция исследования, лабораторные работы, написание и редактирование текста;

Абакумов Е.В. – формулировка рабочей гипотезы, лабораторные работы, написание и редактирование текста;

Лахтионова А.А. – лабораторные работы;

Мавлюдов Б.Р. – полевые экспедиционные работы и сбор материала, написание и редактирование текста.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Information about the authors

Vyacheslav Igorevich Polyakov, born in 1993, graduated from St. Petersburg State Agrarian University in 2021. Since 2015, he has been working as an engineer at the Department of Applied Ecology of St. Petersburg State University. Research interests: soil ecology, soil-atmosphere system interaction, ecosystem services, ecotoxicological state of soil cover in large cities of Russia, biodiversity, conservation biology, biogeochemical nutrient cycles, regulation of ecosystem processes, recreation and ecotourism, ecosystem remediation, carbon sequestration, landscape transformation in the context of climate change, formation of carbon polygons in Russia.

Evgeny Vasilevich Abakumov, born in 1978, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences (Department of Agricultural Sciences), Head of the Department of Applied Ecology, St. Petersburg State University. Research interests: Arctic and Antarctic soils, natural organic matter, ecotoxicology, applied ecology.

Alyona Aleksandrovna Lakhtionova, born in 1990, postgraduate student of the Department of Applied Ecology, St. Petersburg State University. Research interests: ecological state of aquatic and soil environments, biodiversity, bioindication, biogeography, rational nature management, sustainable development.

Bulat Rafaelevich Mavlyudov, born in 1951, Candidate of Geographic Sciences, senior researcher of the Glaciology Department, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences. Research interests: glaciology, glacier dynamics, mass balance, glaciospeleology, speleoglaciology.

Authors Contribution

Polyakov V.I. - research concept, laboratory works, text writing and editing;

Abakumov E.V. - working hypothesis formulation, laboratory works, text writing and editing;

Lakhtionova A.A. - laboratory works;

Mavlyudov B.R. - field expedition works and material collection, text writing and editing.

All co-authors - approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022 г., принята к публикации 19.07.2022 г.

The article was submitted on March 22, 2022, accepted for publication on July 19, 2022.