

УДК 550.42

## ГЕОБИОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПОБЕРЕЖЬЯ БЕЛОГО МОРЯ В 2021 И 2022 гг.

© 2023 г. Е. И. Котова<sup>1,\*</sup>, В. Ю. Топчая<sup>1</sup>, Ю. В. Новикова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральный центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия

\*e-mail: [ecopp@yandex.ru](mailto:ecopp@yandex.ru)

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 30.11.2022 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Исследован снежный покров прибрежной зоны Онежского и Двинского заливов Белого моря на содержание главных ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), биогенных элементов (фосфор, кремний, азот), его альгологический состав. Показано, что морские аэрозоли даже в зимний период оказывают значительное влияние на окружающую среду прибрежных районов.

**Ключевые слова:** снег, прибрежная зона, ионный состав, биогены, альгологический состав

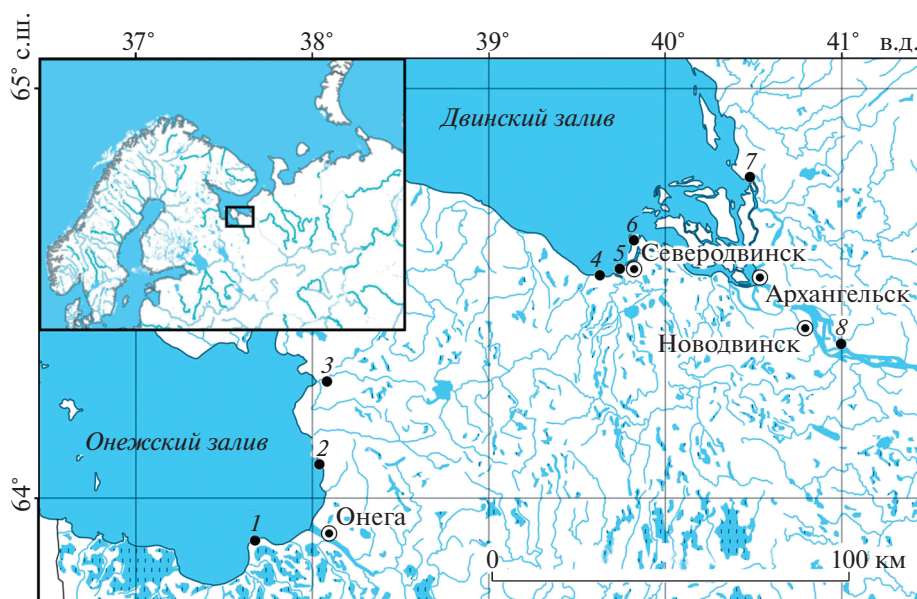
**DOI:** 10.31857/S207667342301009X, **EDN:** MABLAC

### ВВЕДЕНИЕ

В Арктике снежный покров – связующее звено для ключевых физических, химических и микробиологических процессов, влияющих на окисление, биоразнообразие, радиацию и климат Арктики (Mortazavi et al., 2019). Состав снежного покрова – один из факторов, воздействующих на гидрохимический режим территории. Снег накапливает значительное количество твёрдых и растворённых веществ, поступающих из атмосферы, которые высвобождаются во время весеннего таяния, в том числе в форме ионного импульса (Filippa et al., 2010; Виноградова, Котова, 2016). Снежный покров влияет на круговорот азота и потоки парниковых газов, в том числе в условиях изменения климата (Brina et al., 2018, Iwataa et al., 2018). Проведённые работы по изучению взаимодействия между снежным покровом и почвой (Brooks, Williams, 1999; Coelho et al., 2012; Ferrera et al., 2018) показали влияние снежного покрова и процесса снеготаяния на состав и структуру почвы. Таким образом, исследование состава снежного покрова и его воздействие на подстилающую поверхность позволит оценить нагрузки на экосистему, а также выявить закономерности процессов перераспределения веществ в арктических районах. На территории побережья Белого моря, где устойчивый снежный покров сохраняется более четырёх месяцев, актуальность анализа состава снежного покрова несомненна.

Прибрежные зоны представляют собой переходные районы тесного взаимодействия суши и моря. В прибрежной зоне значимую роль в процессе формирования состава компонентов окружающей среды играют морские аэрозоли (Дроздова, 1964; Шевченко, 2006; Котова и др., 2012). Несмотря на то, что в западной части российской Арктики в зимний период большая часть акваторий покрыта льдом, морской аэрозоль поступает от незамерзающих акваторий Баренцева моря, через трещины и полыньи. Как следует из литературных источников (Шевченко, 2011; Стародымова, 2020) основное внимание исследователи уделяли содержанию и составу нерастворённого вещества снега рассматриваемой территории. Однако работ, посвященных содержанию растворённых веществ и микроводорослей в снеге прибрежных территорий Белого моря, недостаточно. Для оценки масштабов воздействия морских аэрозолей проведён анализ ионного состава снежного покрова.

Свойства снежного покрова как системы взаимодействия химических веществ и микроорганизмов, которая постоянно подвержена изменениям под воздействием внутренних и внешних факторов, ещё мало изучены. Доказана роль микроорганизмов в динамике биогенных веществ (Hodson et al., 2008). Исследования биоты ледяного и снежного покрова в регионе носят несистематичный и фрагментарный характер (Мельников и др., 2005; Сажин и др., 2011).



**Рис. 1.** Схема расположения точек отбора проб снега: 1 – село Ворзогоры; 2 – Каменный ручей; 3 – пос. Кянда; 4 – р. Солза; 5 – залив Параниха; 6 – о. Ягры; 7 – пос. Лапоминка; 8 – р. Лявля. На врезке – район работ.

**Fig. 1.** Scheme of positions of the sampling sites of snow: 1 – Vorzogory village; 2 – Kamennyy ruchey; 3 – Kyanda village; 4 – Solza River; 5 – Paranikha Bay; 6 – Yagry Island; 7 – Lapominka village; 8 – Lyavlya River. The inset shows the area of work.

Для исследуемого района характерно наличие осушек – участков дна, непосредственно прилегающих к берегу и обнажающихся во время отлива. При таянии снега, в том числе в период оттепелей, вещества поступают в первую очередь на территории осушки в донные отложения, а затем только в морские воды. Увеличение числа микроводорослей в снежном покрове может генерировать дополнительный приток органического углерода в прибрежные районы и в морские воды и сформировать тенденцию к его накоплению в донных осадках Белого моря.

Цель исследования – анализ характера залегания снега и состава снежного покрова побережья Белого моря.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб снежного покрова проводился в семи районах на побережье Двинского и Онежского заливов Белого моря. Одна точка располагалась в устье р. Северная Двина (рис. 1). Отбор проб проводился в период максимального снегонакопления, в марте 2021/22 гг. Снег собирали в пластиковую тару с помощью пластикового пробоотборника на всю глубину залегания (исключая самый нижний пятисантиметровый слой). Одновременно с отбором проб определяли характеристики залегания снега (толщину снежного покрова, влагозапас и плотность снега) и свойства отложенного снега в соответствии с Международной классификаций сезонно-талого снега (Fierz et al., 2009).

В лаборатории пробы растапливали при комнатной температуре и фильтровали через предварительно взвешенные мембранные фильтры диаметром 47 мм с диаметром пор 0.45 мкм. Количественный химический анализ анионного состава проб проводили методом ионной хроматографии (ФР.1.31.2005.01724, ПНД Ф 16.1.8-98). Погрешность определения не превышает 20%.

Для определения фитопланктона пробы концентрировались методом седиментации. Фиксация проводилась раствором Люголя. Определение видового состава и численности микроводорослей проводили стандартными методами (Руководство по гидробиологическому мониторингу..., 1992). Концентрированные пробы просматривали и проводили идентификацию под микроскопом “БиОптик С-300” при увеличении  $\times 400$ . Таксономическая принадлежность организмов приведена в соответствии с глобальной базой данных AlgaBase (<https://www.algaebase.org/>). Фотографии сделаны при увеличении  $\times 400$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Характер залегания снега.** Толщина снежного покрова меняется в широком диапазоне. Её минимальное значение (11 см) зафиксировано в 2022 г. на побережье Двинского залива у р. Солза (т. 4). Максимум (65 см) отмечен в 2022 г. на восточном побережье Онежского залива у села Ворзогоры (т. 1), где берег высокий (38 м) и крутой. Это приводит к тому, что в результате ветрового переноса толщина снега на коренном берегу Се-

верной Двины в устьевой её части (т. 8) больше (63 см), чем в русле реки. На более открытых пространствах – на побережье Двинского залива или в русле реки, подверженных воздействию ветра, толщина снега меньше.

На побережье Онежского залива в 2022 г. толщина снежного покрова была выше, чем в 2021 г., что вызвано большим количеством осадков, выпавших в зимний период в 2022 г. На побережье Двинского залива, наоборот, в 2022 г. толщина снежного покрова в среднем была меньше из-за наблюдавшихся здесь оттепелей.

Итоговая толщина снежного покрова зависит от многих факторов, в числе которых и оттепели, приводящие к уплотнению снега. Поэтому более показательной характеристикой снежного покрова считается запас воды в снеге (снегозапас). Так, на побережье Двинского залива в 2021/22 г. его среднее значение составило 6 мм. И количество осадков в данном районе в 2022 г. было больше лишь в 1.2 раза. На побережье Онежского залива снегозапас составлял 7 мм в 2021 г. и 12 мм в 2022 г. Количество выпавших в зимний период осадков в 2022 г. оказалось в 1.5 раза выше. При этом несколько возросла плотность снега: с  $0.18–0.21 \text{ г/см}^3$  в 2021 г. до  $0.23–0.24 \text{ г/см}^3$  в 2022 г. Этому способствовали положительные температуры воздуха, доходившие в феврале 2022 г. до  $3^\circ\text{C}$ . В 2021 г. потеплений в зимний период не было, зима была холодной, температура воздуха в январе–феврале была почти вдвое ниже, чем в 2022 г. Структура снежной толщи подтверждает отсутствие оттепелей в 2021 г., тогда как в 2022 г. в снежной толще отмечены ледяные корки.

**Уровень рН талых вод** на побережье Белого моря изменялся от 4.5 до 6.1. В 2022 г. средние значения рН составляли 4.9, а в 2021 г. – 5.9. Более высокие значения в оба года получены в пробах, отобранных у Каменного ручья (5.8–6.1), вблизи карьера по добыче гранита, и в районе залива Параниха (5.2–5.9), расположенном ближе к городу. Считается (Хуе et al., 2020; Макаров, Торговкин, 2021), что снежный покров вблизи промышленных источников обладает более щелочными свойствами. Кроме того увеличению уровня рН способствуют продукты горения (Шестеркин и др., 2009) и деятельность горнодобывающих карьеров (Бахмет и др., 2021). В 2022 г. отмечены низкие значения рН (4.5) в пробах, отобранных на побережье Онежского залива в местечках Ворзогоры (т. 1) и Кянда (т. 3) вдали от гранитного карьера и промышленных источников.

**Минерализация.** Значения минерализации талых вод на побережье Двинского залива не опускаются ниже 20 мг/л. Вблизи залива Параниха (т. 5) в оба года снежный покров отличался высокой минерализацией – 140–204 мг/л, что вызвано повышенным содержанием морских ионов в снеге.

Для побережья Онежского залива характерна низкая минерализация талой фазы снежного покрова – всего 8–12 мг/л. Однако в 2022 г. значение минерализации в пробе, отобранной у Каменного ручья (т. 2), составило 680 мг/л из-за поступления морских аэрозолей. Минерализация талых вод в устьевой части низкая – в среднем 10.1–12.9 мг/л.

**Ионный состав.** По соотношению ионов в снежном покрове точки наблюдений можно разделить на две группы (табл. 1). Первая группа включает точки отбора непосредственно на побережье (т. 1–6), а вторая группа содержит точки в устьевой части рек (т. 7–8).

В пробах снега, отобранных на побережье, в ионном составе хлориды преобладают над сульфатами, а также натрия над кальцием и магнием. Такое соотношение ионов характерно для приморских территорий (Дроздова и др., 1964). В пробах снежного покрова залива Параниха (т. 5) ежегодно регистрируется значительное содержание хлорид-ионов (38–52 мг/л), ионов натрия (18–30 мг/л) и магния (2.7–5.0 мг/л). В 2022 г. в районе Каменного ручья также определено высокое содержание хлоридов – 335 мг/л, сульфатов – 47 мг/л, ионов натрия – 166 мг/л, магния – 25 мг/л, кальция – 11 мг/л. Причина заключается в выходе морской воды на лед вследствие нагонных явлений и приливов. При поступлении морской воды возможно подтаивание снежного покрова, уменьшение водозапаса и толщины снега, но этого не было зафиксировано.

В устьевой части рек (т. 7–8) преобладающим анионом служит сульфат-ион. Его среднее содержание составляет 1.52 мг/л. Среди катионов преобладают ионы кальция (в среднем 0.97 мг/л). В зонах влияния техногенных выбросов городов Архангельск, Новодвинск и Северодвинск отмечено увеличение содержания сульфат-ионов, ионов кальция и магния. Увеличению концентрации ионов кальция и сульфатов в снежном покрове может способствовать присутствие судов в порту Архангельск (Zhan et al., 2014). Содержание хлоридов в снеге устьевых областей не превышало значения 1.2 мг/л, ионов натрия – 0.96 мг/л.

**Биогенные элементы.** Азот, фосфор и кремний лимитируют развитие живых организмов. Содержание растворённого кремния в талых водах было высоким в русле р. Северная Двина (т. 8):  $39.6 \text{ мкгSi/л}$  (табл. 2), где заметно влияние урбанизации (города Архангельск и Новодвинск), а также атмосферных выбросов Архангельского целлюлозно-бумажного комбината. Высокими также были концентрации у Каменного ручья (т. 2) –  $23.0 \text{ мкгSi/л}$  и в районе залива Параниха (т. 5) –  $20.4 \text{ мкгSi/л}$ . В первом случае основным источником загрязнения снега служит минеральная пыль от гранитного карьера, расположенного в 7 км,

**Таблица 1.** Содержание основных ионов в снежном покрове, мг/л

Район	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Село Ворзогоры (т. 1)	0.9*	0.7	0.7	0.4	0.1
Каменный ручей (т. 2)	112.3	16.1	55.8	4.0	8.3
Пос. Кянда (т. 3)	0.5	0.6	0.4	0.5	0.1
Река Солза (т. 4)	2.9	1.1	1.9	0.6	0.4
Залив Параниха (т. 5)	44.8	6.0	24.1	2.1	3.9
Остров Ягры (т. 6)	8.2	2.2	4.7	0.8	0.8
Пос. Лапоминка (т. 7)	0.5	0.9	0.4	0.5	0.1
Река Лявля (т. 8)	0.5	1.7	0.6	1.1	0.3
Побережье Белого моря	$\frac{0.2-335^{**}}{18 \pm 30}$	$\frac{0.5-47}{3.5 \pm 4.1}$	$\frac{0.2-166}{9.5 \pm 15}$	$\frac{0.3-11}{1.3 \pm 1.1}$	$\frac{0.1-25}{1.5 \pm 2.2}$
Приморский край (Кондратьев и др., 2017)	5.2	4.9	2.7	2.5	0.4
Гренландия (цит. по Василенко, 1985)	0.04–0.6	0.1–0.25	0.02–0.13	0.006–0.1	0.005–0.02
Вблизи арктической Аляски (Krnavek et al., 2012)	12.53	0.86	5.78	0.36	0.85

\*Средние значения для района за весь период наблюдения. \*\*В числителе указано максимальное – минимальное наблюдаемое значение, в знаменателе – среднее значение из всех наблюдаемых значений ± среднее квадратичное отклонение.

**Таблица 2.** Химический состав снежного покрова

№ точки	pH, ед. pH	M, мг/л	N <sub>NO<sub>2</sub></sub> , мкгN/л	N <sub>NO<sub>3</sub></sub> , мкгN/л	N <sub>общ.</sub> , мгN/л	Si, мкгSi/л	P <sub>общ.</sub> , мкгP/л	P <sub>орг.</sub> , мкгP/л
Село Ворзогоры (т. 1)	5.1*	12.2	0.3	266.6	0.7	2.6	12.9	7.5
Каменный ручей (т. 2)	5.8	233.7	3.2	244.8	0.6	23.0	7.5	7.3
Пос. Кянда (т. 3)	5.0	9.2	0.4	218.9	0.7	3.8	20.5	11.6
Река Солза (т. 4)	5.2	21.8	1.2	233.6	0.6	12.8	8.0	5.3
Залив Параниха (т. 5)	5.6	172.0	2.4	219.1	0.7	20.4	7.0	4.6
Остров Ягры (т. 6)	5.1	41.4	0.8	247.3	0.6	14.0	11.5	5.3
Пос. Лапоминка (т. 7)	4.9	10.3	0.4	236.2	0.7	6.4	7.2	4.4
Река Лявля (т. 8)	5.7	12.5	5.9	248.2	0.7	39.6	11.9	6.0
Побережье Белого моря	$\frac{4.5-6.7^{**}}{5.4 \pm 0.6}$	$\frac{6.4-680}{53 \pm 67}$	$\frac{0.3-5.9}{1.5 \pm 1.2}$	$\frac{202-287}{241 \pm 22}$	$\frac{0.6-0.9}{0.7 \pm 0.1}$	$\frac{1.3-40}{11 \pm 7}$	$\frac{6.3-20.5}{10.6 \pm 3}$	$\frac{2.4-11.7}{6.0 \pm 1.7}$
Водосбор Белого моря (Шевченко, 2021; 2022)	5.37–7.68	2–57	0.12–8.97	89–197	0.27–0.87	7.8–83.6	1–47.3	–

\*Средние значения для района за весь период наблюдения; \*\*В числителе указано максимальное – минимальное наблюдаемое значение, в знаменателе – среднее значение из всех наблюдаемых значений ± среднее квадратичное отклонение.

и скальные обнажения данной части побережья Онежского залива, а во втором — пылевое воздействие города Северодвинска. При росте толщины снежного покрова содержание кремния в нем снижается (коэффициент корреляции –0.5) из-за “разбавления” концентрации кремния снегом.

Содержание общего азота в талых водах снежного покрова составило 0.6–0.9 мгN/л (см. табл. 2). В отличие от содержания нитратной формы азо-

та, содержание азота нитритного характеризуется большей пространственной изменчивостью. Минимальные значения 0.3–0.4 мкгNO<sub>2</sub>/л определены на побережье Онежского залива (т. 1, 3) и в устье р. Лапа (т. 7). Высокое содержание нитритного азота (5.9 мкгNO<sub>2</sub>/л) получено в т. 8, расположенной в дельте р. Северная Двина, подверженной антропогенному воздействию близлежащих городов Архангельска и Новодвинска. По данным

(Mayewski et al., 1990; Eichler et al., 2009) источником антропогенного азота в снеге считаются выбросы автотранспорта и производство энергии. Повышенное содержание нитритного азота отмечено в снежном покрове залива Параниха (т. 5) — 2.4 мкгNO<sub>2</sub>/л, и у Каменного ручья (т. 2) — 3.2 мкгNO<sub>2</sub>/л, где получены высокие значения минерализации и содержания морских ионов.

Фоновые концентрации фосфора определены теми же факторами, что и поступление аммонийного и нитритного азота. Среднее содержание фосфора общего составило 10.6 мкгP<sub>общ</sub>/л, органического — 6.0 мкгP<sub>орг</sub>/л. Максимальные значения обоих форм фосфора, 20.5 и 11.7 мкгP/л соответственно, определены в районе пос. Кянда (т. 3). Здесь расположены фермерские хозяйства, которые могут быть дополнительным источником фосфора в атмосферном воздухе, так как мелкие растительные остатки, споры, пыльца и иные продукты метаболизма растений могут давать существенное увеличение сезонных концентраций фосфора в атмосфере сельских районов (Савенко, Савенко, 2007).

Доля органического фосфора в составе общего фосфора изменяется в широком диапазоне. В районе устья р. Лапа (т. 7) доля органического фосфора минимальна — 0.38, здесь же в 2022 г. определены и минимальные концентрации форм фосфора: 2.4 мкгP<sub>орг</sub>/л и 6.3 мкгP<sub>общ</sub>/л. На побережье Онежского залива (т. 2) доля органического фосфора составила 0.95. Содержание общего фосфора здесь также было невелико — 7.5 мкгP<sub>общ</sub>/л. Корреляционный анализ данных показал увеличение содержания форм фосфора выше при росте снегозапасов (коэффициент корреляции — 0.4–0.7).

**Сравнение уровня ионов и элементов с последними исследованиями.** В снежном покрове побережья Белого моря (см. табл. 1–2) отмечено более высокое среднее содержание хлоридов и натрия по сравнению с другими прибрежными территориями (Василенко, 1985; Кондратьев и др., 2017), в том числе арктическими (Krnavek et al., 2012). Это связано с поступлением морских аэрозолей в незамерзающих территории Баренцева моря. Сравнение данных о содержании биогенных элементов в снежном покрове прибрежной зоны Белого моря и всего водосборного бассейна этого моря (см. табл. 2) показало, что в прибрежной зоне ниже содержание нитритной формы азота, кремния и фосфора общего, но выше содержание нитратной формы азота.

**Микроводоросли.** За рассматриваемый период в пробах снега обнаружено 14 таксонов микроводорослей (виды и надвидовые таксоны), относящихся к отделу *Bacillariophyta* (диатомовые) (табл. 3). В 2021 г. снег был заселен типичными представителями альгофлоры северных морей — *Rhizosolenia setigera*,

а также обитателями пресноводных экосистем — *Tabellaria fenestrata*. В этом году неретический бореальный вид *Rhizosolenia setigera* (рис. 2) доминировал во всех районах исследования, за исключением района Солза (см. табл. 3). Его численность по разным станциям варьировала от 0.063 тыс. кл./л на станции Ворзогоры до 0.008 тыс. кл./л на станции Ягры. На обеих станциях *Rhizosolenia setigera* — единственный обнаруженный вид водорослей. В 2022 г. представители этого вида не обнаружены ни в одной пробе. В 2022 г. в пробах снега доминировали *Naviculasp.* (т. 6–7), *Aulacoseira granulata* (т. 4) и *Melosira arctica* (т. 2).

В 2022 г. в большинстве проб обнаружены пресноводные виды фитопланктона, типичные для северо-западного региона. В западной части Двинского залива (Параниха и Солза) обнаружены арктические виды: *Melosira arctica* (см. рис. 2) и *Nitzschia frigida*. *Melosira arctica* — диатомовая колониальная микроводоросль, морской арктический вид, встречающийся в толще арктических плавучих льдов. Этот вид, как правило, обитает на нижней поверхности двухлетнего и многолетнего льда, образуя буро-зелёные длинные цепочковидные колонии. *Nitzschia frigida* массово размножаются средних и верхних слоях толщи таких льдин. *Nitzschia frigida* — арктический неретический вид диатомовых микроводорослей; обитает среди льдов и на льдах, при таянии льда формирует начальную фазу “цветения” (Сапожников и др., 2019). Важную роль в этих процессах играют различия в гидрометеорологических условиях года, влияющих на характер залегания снега. Для 2022 г. характерны оттепели, благоприятные для развития микроводорослей.

Общая численность микроводорослей в снежном покрове в оба года наблюдений самой большой была в районе залива Параниха (т. 5), где наиболее велико содержание в снеге ионов морского происхождения (в 2022 г. 1.293 тыс. кл./л). Здесь же зафиксировано и наибольшее видовое разнообразие водорослей — шесть видов и надвидовых таксонов. На побережье Онежского залива в 2022 г. (т. 1–2) водоросли в пробах снега обнаружены не были. Особенно странно это для точки 2, где определены высокие значения минерализации талых вод.

Анализ данных показал, что численность водорослей в снежном покрове не зависит от минерализации и содержания главных ионов (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>). Важное значение имеет обеспеченность водорослей азотом, фосфором и кремнием, которые активно включаются в образование основных компонентов клетки. Лимитирующий фактор — соотношение форм азота. При увеличении числа особей альгофлоры снижается концентрация нитратов. Больше количество

Таблица 3. Видовой состав и численность водорослей в пробах снежного покрова

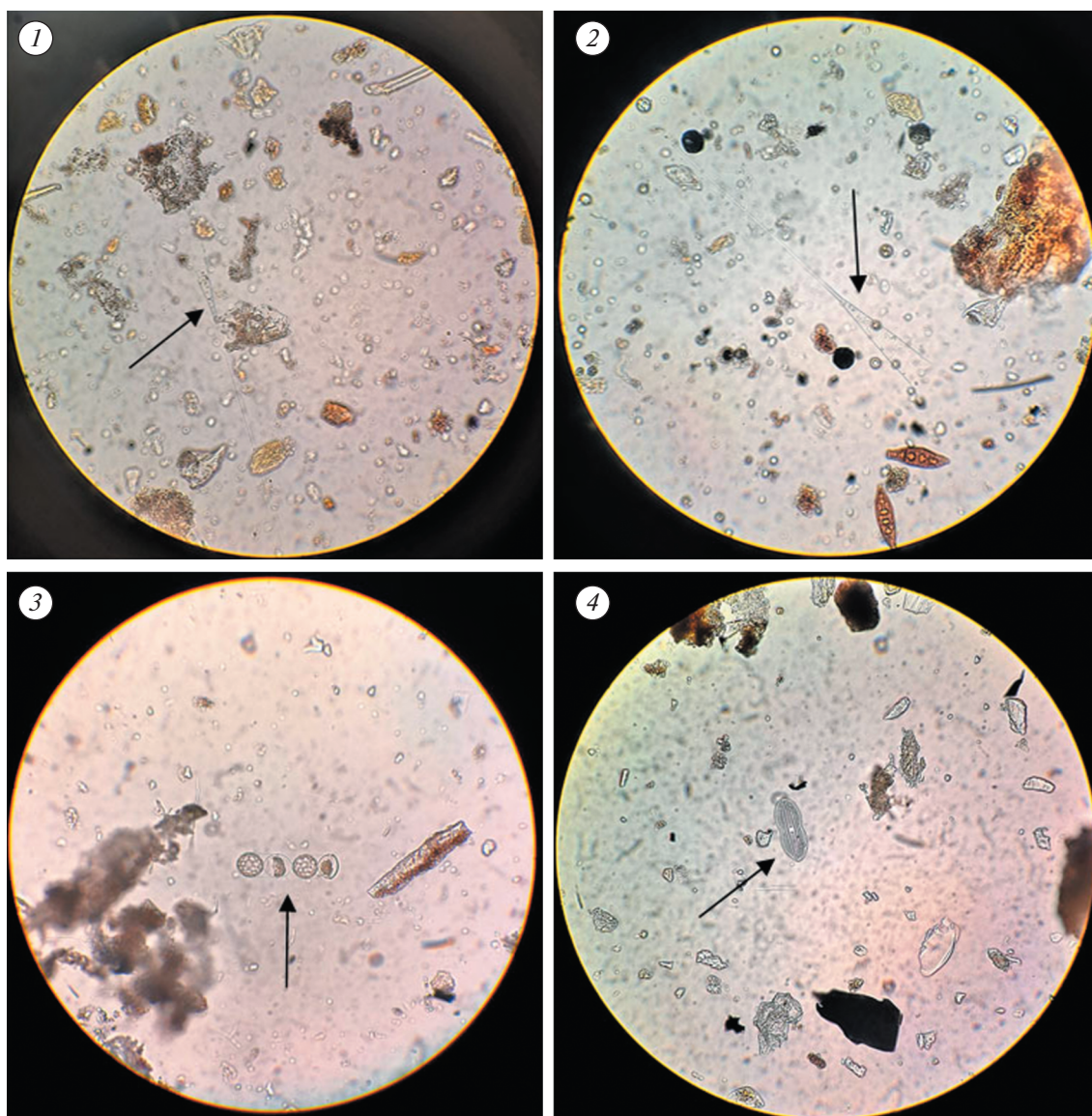
Таксономическая группа, вид	Отдел	Численность в 2021/22 г., тыс. кл./л	Общая численность в 2021/22 г., тыс. кл./л
<i>Параниха (т. 2)</i>			
Rhizosolenia setigera Brightwell, 1858	Bacillariophyta	0.045/–	0.073/1.293
Navicula sp.	Bacillariophyta	0.018/0.217	
Hantzschia sp.	Bacillariophyta	0.009/–	
Melosira arctica Dickie, 1852	Bacillariophyta	–/0.465	
Aulacoseira granulata (Ehrenberg) Simonsen, 1979	Bacillariophyta	–/0.341	
Nitzschia frigida Grunow, 1880	Bacillariophyta	–/0.255	
Pinnularia sp.	Bacillariophyta	–/0.008	
Synedra sp.	Bacillariophyta	–/0.008	
<i>Ворзогоры (т. 1)</i>			
Rhizosolenia setigera Brightwell, 1858	Bacillariophyta	0.063/–	0.063/–
<i>Лапоминка (т. 7)</i>			
Rhizosolenia setigera Brightwell, 1858	Bacillariophyta	0.018/–	0.045/0.127
Navicula sp.	Bacillariophyta	0.018 /0.039	
Tabellaria fenestrata (Lyngbye) Kützing, 1844	Bacillariophyta	0.009/–	
Aulacoseira granulata (Ehrenberg) Simonsen, 1979	Bacillariophyta	–/0.029	
Nitzschia sp.	Bacillariophyta	–/0.020	
Cocconeis sp.	Bacillariophyta	–/0.039	
<i>Каменный ручей (т. 2)</i>			
Rhizosolenia setigera Brightwell, 1858	Bacillariophyta	0.025/–	0.034/–
Diploneis sp.	Bacillariophyta	0.008/–	
<i>Солза (т. 4)</i>			
Cyclotella sp.	Bacillariophyta	0.007/–	0.030/0.303
Achnanthes sp.	Bacillariophyta	0.015/–	
Navicula sp.	Bacillariophyta	0.007/0.021	
Aulacoseira granulata (Ehrenberg) Simonsen, 1979	Bacillariophyta	–/0.230	
Melosira arctica Dickie, 1852	Bacillariophyta	–/0.021	
Nitzschia sp.	Bacillariophyta	–/0.031	
<i>Ягры (т. 6)</i>			
Rhizosolenia setigera Brightwell, 1858	Bacillariophyta	0.008/–	0.008/0.003
Navicula sp.	Bacillariophyta	–/ 0.003	

особей определено в снеге, где повышено содержание нитритов. Обусловлено это тем, что эта форма азота – наиболее потребляемая в природных водах (наряду с азотом аммиака и мочевины) для построения клеток фитопланктона (Mc Carthy, 1972). В пробах с более высоким содержанием кремния присутствовало большее число особей. Рост числа представителей диатомовых приводит к снижению содержания фосфора. Для построения клеток диатомовые водоросли извлекают из воды кремний и фосфор в равном соотношении (Виноградов, 1935), таким образом можно предположить, что в данном случае количество крем-

ния в снеге было достаточно для развития фитопланктона или его концентрации превышали потребление.

## ВЫВОДЫ

По полученным данным, снежный покров на побережье Белого моря был неоднороден: в районе Онежского залива в 2022 г. снега было больше, чем в 2021, а в Двинском заливе, наоборот, в 2022 г. меньше. Причина заключалась в большом количестве осадков на побережье Онежского залива и оттепелях в период залегания снега на террито-



**Рис. 2.** Микроводоросли в снеге побережья Белого моря (увеличение 400×): 1 – *Rhizosolenia setigera* (о. Ягры, март 2021 г.); 2 – *Rhizosolenia setigera* (залив Параниха, март 2021 г.); 3 – *Melosira arctica* (залив Параниха, март 2022 г.); 4 – *Diploneis* sp. (Каменный ручей, март 2021 г.).

**Fig. 2.** Microalgae in the snow of the White Sea coast (magnification 400×): 1 – *Rhizosolenia setigera* (Yagry Island, March 2021); 2 – *Rhizosolenia setigera* (Paranikha Bay, March 2021); 3 – *Melosira arctica* (Paranikha Bay, March 2022); 4 – *Diploneis* sp. (Kamennyu rucheу, March 2021).

рии Двинского залива. На побережье Белого моря снег имеет слабокислую реакцию (среднее значение pH 5.4); уровень pH талой фазы снега в 2021–2022 гг. изменялся в диапазоне 4.5–6.1, в 2022 г. значения pH были ниже, чем в 2021 г. В эти годы минерализация снежного покрова на побережье Двинского залива была значительно выше (140–204 мг/л) по сравнению с побережьем Онежского залива (8–12 мг/л). Ионный состав снега прибрежной зоны характеризуется повышенным содержанием  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ , а в устьевой части рек –  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . Повышенное содержание морских

ионов и значения минерализации в прибрежных районах Белого моря объясняются ежегодным выходом на лед морской воды в результате нагонных явлений, то есть морские аэрозоли оказывают значительное влияние на окружающую среду прибрежных районов в зимний период. Перенос пыли из зон урбанизации (Архангельск, Новодвинск и Северодвинск) и с гранитного карьера на побережье Онежского залива приводят к увеличению содержания растворённого кремния в талых водах снежного покрова в близлежащих районах. Выпадающие осадки снижают концен-

трацию кремния в снежном покрове, а при увеличении снегозапасов содержание форм фосфора растёт.

Численность водорослей в снеге не зависит от минерализации и содержания главных ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ). Дополнительным источником фосфора в снежном покрове служат фермерские хозяйства; лимитирующим фактором служит соотношение форм азота. Содержание нитритного азота в районе исследований характеризуется большой пространственной изменчивостью; его максимальное содержание в снежном покрове характерно для Онежского залива — 3.2 мкг $\text{NO}_2/\text{л}$  в 2022 г. Большое количество особей альгофлоры характерно для снега с повышенным содержанием нитритов; развитию водорослей в снежном покрове способствуют также оттепели.

**Благодарности.** Результаты обобщены и интерпретированы за счёт гранта Российского научно-фонда № 22-77-10074.

**Acknowledgements.** The results were summarized and interpreted at funded by the Russian Science Foundation (No. 22-77-10074).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахмет О.Н., Солодовников А.Н., Дубина-Чехович Е.В.* Влияние аэротехногенного загрязнения на химический состав снежного покрова агроландшафта // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 2. С. 49–53.
- Виноградов А.П.* Химический элементарный состав организмов моря // Тр. Биохимич. лаборатории АН СССР. 1935. Т. 6. С. 1–215.
- Виноградова А.А., Котова Е.И.* Металлы в атмосферных осадках и в водах озер на северо-западе России // Экологическая химия. 2016. Т. 25. № 1. С. 52–61.
- Дроздова В.М., Петренчук О.П., Селезнева В.С., Свистов П.Ф.* Химический состав атмосферных осадков на европейской территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 209 с.
- Кондратьев И.И., Муха Д.Э., Болдескул А.Г., Юрченко С.Г., Луценко Т.Н.* О химическом составе атмосферных осадков и снежного покрова в Приморском крае // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 91–100.
- Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П.* Особенности формирования ионного состава снежного покрова в прибрежной зоне западного сектора Арктических морей России // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 631.
- Макаров В.Н., Торговкин Н.В.* Эколого-геохимическая оценка снежного покрова Якутска // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 420–430.
- Мельников И.А., Дикарев С.Н., Егоров В.Г., Колосова Е.Г., Житина Л.С.* Структура прибрежной экосистемы льда в зоне взаимодействия река-море // Океанология. 2005. Т. 45. № 4. С. 542–550.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В.А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
- Савенко В.С., Савенко А.В.* Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС, 2007. 248 с.
- Сажин А.Ф., Сапожников Ф.В., Ратькова Т.Н., Романова Н.Д., Шевченко В.П., Филиппов А.С.* Население весеннего льда, воды и грунтов Белого моря в устьевой зоне Северной Двины // Океанология. 2011. Т. 51. № 2. С. 307–318.
- Стародымова Д.П., Поповичева О.Б., Шевченко В.П., Кобелев В.О., Новигатский А.Н.* Региональное распределение загрязняющих веществ в снежном покрове индустриального арктического региона // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны: Расширенные тезисы докладов. Москва: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, 2020. С. 110–112.
- Шевченко В.П.* Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
- Шевченко В.П., Белоруков С.К., Булохов А.В., Коробов В.Б., Лохов А.С., Стародымова Д.П., Чульцова А.Л., Яковлев А.Е.* Геохимические особенности снежного покрова водосборов Онежского, Двинского и Мезенского заливов Белого моря в феврале–марте 2020 г. // География: развитие науки и образования. Т. 1. Сб. статей по материалам междунауч.-практич. конф. LXXIV Герценовские чтения. СПб.: Российский гос. пед. ин-т имени А.И. Герцена, 2021. С. 196–200.
- Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Белоруков С.К., Боев А.Г., Коробов В.Б., Котова Е.И., Лохов А.С., Чульцова А.Л., Яковлев А.Е.* Геохимия снежного покрова Приморского района Архангельской области в марте 2021 г. // География: развитие науки и образования. Т. II. Сб. статей по материалам ежегодной междунауч.-практич. конф. (к 225-летию Герценовского ун-та). СПб.: Российский гос. пед. ин-т имени А.И. Герцена, 2022. С. 141–145.
- Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М., Форица Ю.А.* Влияние торфяных пожаров на химический состав снежного покрова и поверхностных вод // География и прир. ресурсы. 2009. № 1. С. 49–54.
- Brina L.D., Goyera C., Zebbartha B.J., Burton D.L., Chantignys M.H.* Changes in snow cover alter nitrogen cycling and gaseous emissions in agricultural soils // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2018. V. 258. P. 91–103.
- Brooks P.D., Williams M.W.* Snowpack controls on N cycling and export in seasonally snow covered catchments // Hydrological Processes. 1999. № 13. P. 2177–2190.
- Coelho B.B., Lapen D., Murray R., Topp E., Bruin A., Khan B.* Nitrogen loading to offsite waters from liquid swine manure application under different drainage and tillage practices // Agricultural Water Management. 2012. № 104. P. 40–50.
- Edwards A.C., Scalenghe R., Freppaz M.* Changes in the seasonal snow cover of alpine regions and its effect on soil processes: a review // Quaternary International. 2007. № 162. P. 172–181.



- Eichler A., Brüttsch S., Olivier S., Papina T., Schwikowski M. A 750 year ice core record of past biogenic emissions from Siberian boreal forests // *Geophys. Research Letters*. 2009. V. 36. L18813. <https://doi.org/10.1029/2009GL038807>
- Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground: IHP–VII Technical Documents in Hydrology №83: IACS Contribution № 1. Paris: UNESCO–IHP, 2009. P. 1–90.
- Filippa G., Freppaz M., Williams M., Zanini E. Major element chemistry in inner alpine snowpacks (Aosta valley region, NW Italy) // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. № 64. P. 158–166.
- Freppaza M., Pintaldia E., Magnania A., Vigliettia D., Williams M.W. Topsoil and snow: a continuum system // *Applied Soil Ecology*. 2018. V. 123. P. 435–440.
- Hodson A., Anesio A.M., Tranter M., Fountain A., Osborn M., Prisco J., Laybourn-Parry J., Sattler B. Glacial ecosystems // *Ecol. Monograph*. 2008. V. 78. P. 41–67.
- Iwata Yu., Yanaia Yo., Yazakia T., Hirotab T. Effects of a snow-compaction treatment on soil freezing, snowmelt runoff, and soil nitrate movement: A field-scale paired-plot experiment // *Journ. of Hydrology*. 2018. V. 567. P. 280–289.
- Krnavek L., Simpson W.R., Carlson D., Domine F., Douglas T.A., Sturm M. The chemical composition of surface snow in the Arctic: Examining marine, terrestrial, and atmospheric influences // *Atmospheric Environment*. 2012. V. 50. P. 349–359.
- Mayewski P., Lyons W., Spencer M., Twickler M., Buck C., Whitlow S. An ice-core record of atmospheric response to anthropogenic sulphate and nitrate // *Nature*. 1990. V. 346. P. 554–556.
- Mc Carthy J.J. The uptake of urea by natural population of marine phytoplankton // *Limnology and Oceanography*. 1972. V. 17. № 5. P. 738–748.
- Mortazavi R., Ariya P.A., Attiya S. Diversity of metals and metal-interactive bacterial populations in different types of Arctic snow and frost flowers: Implications on snow freeze-melt processes in a changing climate // *The Science of the Total Environment*. 2019. V. 690. P. 277–289.
- Wang X., Pu W., Zhang X.Y., Ren Y., Huang J.P. Water-soluble ions and trace elements in surface snow and their potential source regions across north-eastern China // *Atmosphere Environment*. 2015. V. 114. P. 57–65.
- Williams M.W., Seibold C., Chowanski K. Storage and release of Solutes from a subalpine seasonal snowpack: soil and stream water response Niwot Ridge, Colorado // *Biogeochemistry*. 2009. № 95 (1). P. 77–94.
- Xue H., Chen W., Li M., Liu B., Li G., Han X. Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018 // *Chemosphere*. 2020. V. 251. P. 126328.
- Zhan J., Gao Y., Li W., Chen L., Lin H., Lin Q. Effects of ship emissions on summertime aerosols at Ny–Alesund in the Arctic // *Atmospheric Pollution Research*. 2014. V. 5. P. 500–510.

---

Citation: Kotova E.I., Topchaya V.Yu., Novikova Yu.V. Geobiochemical characteristics of the snow cover of the White Sea coast in 2021 and 2022. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (1): 60–70 [In Russian]. doi 10.31857/S207667342301009X

---

## Geobiochemical Characteristics of the Snow Cover of the White Sea Coast in 2021 and 2022

E. I. Kotova<sup>a, #</sup>, V. Yu. Topchaya<sup>a</sup>, and Yu. V. Novikova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>b</sup> N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

<sup>#</sup>e-mail: ecopp@yandex.ru

For two years (2021 and 2022) snow sampling carried out in the coastal zone of the Onega and Dvina Bays of the White Sea during the period of maximum snow accumulation (March). The snow was analyzed for the content of the main ions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ); biogenic elements (phosphorus, silicon, nitrogen), pH and mineralization were determined. The algological composition of the snow cover was also studied. The results showed that the snow was slightly acidic (average pH 5.4).  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  were the main ions in the coastal zone;  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Ca}^{2+}$  in the estuary zone. The high content of marine ions and mineralization were determined near the Paranikha Bay (Dvina Bay), where the release of sea water onto the ice is noted annually. Compared to previous studies, in which snow samples were taken in the costal zone, the content of marine ions in the territory under consideration is an order of magnitude higher. As a result of the influence of marine aerosols, the values of snow cover mineralization can reach 140–680 mg/L. The content of dissolved silicon in melt water is increased in the zone of influence of atmospheric emissions from urbanized territories

(Arkhangelsk, Novodvinsk, Severodvinsk), as well as near the granite quarry on the coast of Onega Bay. During the study period, 14 taxa of microalgae (species and supraspecific taxa) belonging to the division *Bacillariophyta* were found in snow samples. The maximum value of the total number of microalgae (1.293 thousand cells/L.) in the snow cover was determined in 2022.

**Keywords:** snow, coastal zone, ionic composition, nutrients, algological composition

## REFERENCES

- Bahmet O.N., Solodovnikov A.N., Dubina-Chehovich E.V.* Influence of aerotechnogenic pollution on the chemical composition of the snow cover of the agricultural landscape. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. Russian Agricultural Science. 2021, 2: 49–53 [In Russian].
- Vinogradov A.P.* Chemical elementary composition of sea organisms. *Trudy Biohimicheskoy laboratorii Akademii Nauk SSSR*. Proc. of the Biochemical Laboratory of the Academy of Sciences, 1935, 6: 1–215 [In Russian].
- Vinogradova A.A., Kotova E.I.* Metals in atmospheric precipitation and in lakes waters in the north-west of Russia. *Ekologicheskaya himiya*. Ecological chemistry. 2016, 25 (1): 52–61 [In Russian].
- Drozdova V.M., Petrenchuk O.P., Selezneva V.S., Svistov P.F.* Chemical composition of atmospheric precipitation in the European territory of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1964: 209 p. [In Russian].
- Kondrat'ev I.I., Mukha, D.E., Boldeskul A.G., Yurchenko S.G., Lutsenko, T.N.* Chemical composition of precipitation and snow cover in the Primorsky Krai. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2017, 1: 91–100 [In Russian].
- Kotova E.I., Korobov V.B., Shevchenko V.P.* Features of the formation of the ionic composition of the snow cover in the coastal zone of the western sector of the Arctic Seas of Russia. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. Modern problems of science and education. 2012, 6: 631 [In Russian].
- Makarov V.N., Torgovkin N.V.* Ecological and geochemical assessment of the snow cover of Yakutsk. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (3): 420–430 [In Russian].
- Melnikov I.A., Dikarev S.N., Egorov V.G., Kolosova E.G., Zhitina L.S.* Structure of coastal ice ecosystem in the zone of river-sea interaction. *Okeanologiya*. Oceanology. 2005, 45 (4): 542–550 [In Russian].
- Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem*. Guidelines for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992: 318 p. [In Russian].
- Savenko V.S., Savenko A.V.* *Geohimiya fosfora v global'nom gidrologicheskom cikle*. Phosphorus geochemistry in the global hydrological cycle. Moscow: GEOS, 2007: 248 p. [In Russian].
- Sazhin A.F., Sapozhnikov F.V., Ratkova T.N., Romanova N.D., Shevchenko V.P., Filippov A.S.* Population of spring ice, water and soils of the White Sea in the mouth zone of the Northern Dvina. *Okeanologiya*. Oceanology. 2011, 51 (2): 307–318 [In Russian].
- Starodymova D.P., Popovicheva O.B., Shevchenko V.P., Kobelev V.O., Novigatsky A.N.* Regional distribution of pollutants in the snow cover of the industrial Arctic region. *Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy. Ekosistemy i klimat Arkticheskoy zony: Rasshirennye tezisy dokladov*. Monitoring of the state and pollution of the environment. Ecosystems and climate of the Arctic zone: Extended abstracts. Moscow: Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Israel. 2020: 110–112 [In Russian].
- Shevchenko V.P.* *Vliyanie aerorozlej na sredu i morskoe osadkonakoplenie v Arktike*. Influence of aerosols on the environment and marine sedimentation in the Arctic. Moscow: Nauka. 2006: 226 [In Russian].
- Shevchenko V.P., Belorukov S.K., Bulokhov A.V., Korobov V.B., Lokhov A.S., Starodymova D.P., Chultsova A.L., Yakovlev A.E.* Geochemical features of the snow cover in the watersheds of the Onega, Dvina and Mezen bays of the White Sea in February – March 2020. *Geografiya: razvitiye nauki i obrazovaniya. T. I. Sbornik statej po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii LXXIV Gercenovskie chteniya*. Geography: Development of science and education. Vol. I. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference LXXIV Herzen readings. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University. A.I. Herzen. 2021, 1: 196–200 [In Russian].
- Shevchenko V.P., Starodymova D.P., Belorukov S.K., Boev A.G., Korobov V.B., Kotova E.I., Lokhov A.S., Chultsova A.L., Yakovlev A.E.* Geochemistry of the snow cover of the Primorsky district of the Arkhangelsk region in March 2021. *Geografiya: razvitiye nauki i obrazovaniya. T. II. Sbornik statej po materialam ezhegodnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (k 225-letiyu Gercenovskogo universiteta)*. Geography: the development of science and education: Collection of articles based on the materials of the annual international scientific and practical conference (on the 225th anniversary of Herzen University). St. Petersburg: Russian State Pedagogical University. A.I. Herzen. 2022, 1: 141–145 [In Russian].
- Shesterkin V.P., Shesterkina N.M., Forina Ju.A.* Influence of peat fires on the chemical composition of snow cover and surface fires. *Geografija i prirodnye resursy*. Geography and Natural Resources. 2009, (1): 49–54 [In Russian].
- Brina L.D., Goyera C., Zebbartha B.J., Burtonb D.L., Chantignyc M.H.* Changes in snow cover alter nitrogen cycling and gaseous emissions in agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2018, 258: 91–103.
- Brooks P.D., Williams M.W.* Snowpack controls on N cycling and export in seasonally snow covered catchments. *Hydrological Processes*. 1999, 13: 2177–2190.
- Coelho B.B., Lapen D., Murray R., Topp E., Bruin A., Khan B.* Nitrogen loading to offsite waters from liquid swine manure application under different drainage and tillage practices. *Agricultural Water Management*. 2012, 104: 40–50.

- Edwards A.C., Scalenghe R., Freppaz M.* Changes in the seasonal snow cover of alpine regions and its effect on soil processes: a review. *Quaternary International*. 2007, 162: 172–181.
- Eichler A., Brütsch S., Olivier S., Papina T., Schwikowski M.* A 750 year ice core record of past biogenic emissions from Siberian boreal forests. *Geophys. Research Letters*. 2009, 36: L18813.  
<https://doi.org/10.1029/2009GL038807>
- Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A.* The International Classification for Seasonal Snow on the Ground: IHP–VII Technical Documents in Hydrology № 83: IACS Contribution № 1. Paris: UNESCO–IHP. 2009: 1–90.
- Filippa G., Freppaz M., Williams M., Zanini E.* Major element chemistry in inner alpine snowpacks (Aosta valley region, NW Italy). *Cold Reg. Science and Technology*. 2010, 64: 158–166.
- Freppaza M., Pintaldia E., Magnania A., Vigliettia D., Williams M.W.* Topsoil and snow: a continuum system. *Applied Soil Ecology*. 2018, 123: 435–440.
- Hodson A., Anesio A.M., Tranter M., Fountain A., Osborn M., Prisco J., Laybourn-Parry J., Sattler B.* Glacial ecosystems. *Ecolog. Monography*. 2008, 78: 41–67.
- Iwataa Yu., Yanaia Yo., Yazakia T., Hirotab T.* Effects of a snow-compaction treatment on soil freezing, snowmelt runoff, and soil nitrate movement: A field-scale paired-plot experiment. *Journ. of Hydrology*. 2018, 567: 280–289.
- Krnavek L., Simpson W.R., Carlson D., Domine F., Douglas T.A., Sturm M.* The chemical composition of surface snow in the Arctic: Examining marine, terrestrial, and atmospheric influences. *Atmospheric Environment*. 2012, 50: 349–359.
- Mayewski P., Lyons W., Spencer M., Twickler M., Buck C., Whitlow S.* An ice-core record of atmospheric response to anthropogenic sulphate and nitrate. *Nature*. 1990, 346: 554–556.
- Mc Carthy J.J.* The uptake of urea by natural population of marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography*. 1972, 17 (5): 738–748.
- Mortazavi R., Ariya P.A., Attiya S.* Diversity of metals and metal-interactive bacterial populations in different types of Arctic snow and frost flowers: Implications on snow freeze-melt processes in a changing climate. *The Science of the Total Environment*. 2019, 690: 277–289.
- Wang X., Pu W., Zhang X.Y., Ren Y., Huang J.P.* Water-soluble ions and trace elements in surface snow and their potential source regions across north-eastern China. *Atmos. Environment*. 2015, 114: 57–65.
- Williams M.W., Seibold C., Chowanski K.* Storage and release of Solutes from a subalpine seasonal snowpack: soil and stream water response Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry*. 2009, 95 (1): 77–94.
- Xue H., Chen W., Li M., Liu B., Li G., Han X.* Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018. *Chemosphere*. 2020, 251: 126328.
- Zhan J., Gao Y., Li W., Chen L., Lin H., Lin Q.* Effects of ship emissions on summertime aerosols at Ny–Alesund in the Arctic. *Atmospheric Pollution Research*. 2014, 5: 500–510.