

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.3.054

ОЦЕНКА АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВБЛИЗИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ТУНДРОВОЙ ЗОНЕ (НА ПРИМЕРЕ г. ВОРКУТЫ)

© 2019 г. М. И. Василевич^{1,*}, Р. С. Василевич¹, Д. Н. Габов¹, Б. М. Кондратёнок¹

¹Институт биологии Коми научного центра УрО РАН – обособленное подразделение ФГБУН “Федеральный исследовательский центр Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук”, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, Республика Коми, 167982 Россия
*E-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 18.07.2019 г.

После исправления 9.09.2019 г.

Проведен количественный химический анализ снежного покрова на территории Воркутинской агломерации. Сделаны расчеты поступления поллютантов на территории вблизи промышленных предприятий г. Воркуты. Построены карты-схемы распределения веществ в снеге на данной территории. Установлены “контрольные” уровни аэротехногенного загрязнения города, промышленных зон и прилегающих территорий для последующего экологического мониторинга. В связи с высоким содержанием щелочных компонентов (гидрокарбонатов кальция и магния) значения pH талых вод достигают 6.5–7.2. Установлено превышение предельно допустимых концентраций (ПДК_{рх}) марганца, никеля, алюминия, ванадия, молибдена и ртути. Высокие значения концентрации ртути в снеге предположительно обусловлены сжиганием угля на ТЭЦ и ее возможной сорбцией на угольных и зольных частицах. Показано, что по содержанию в снеге ртути и ванадия можно установить зоны наибольшего аэрогенного воздействия. Доля элементов в составе взвешенных частиц составляет более 60% от общего содержания в талой воде. Наиболее сильное загрязнение снежного покрова зафиксировано вблизи ТЭЦ-2. Согласно расчетам суммарного индекса загрязнения, наибольшие значения кратностей поступления веществ над фоновым уровнем отмечены на территории санитарно-защитной зоны ТЭЦ-2.

Ключевые слова: снежный покров, аэрогенное загрязнение, тундровая зона, Воркутинская агломерация, экохимический мониторинг.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019694-105>

ВВЕДЕНИЕ

Экологические проблемы Арктики имеют не только региональное, но и глобальное значение. На хрупкую экосистему региона, расположенного в высоких широтах, границей которой является Северный полярный круг, оказывают негативное влияние не только экстремальные природные факторы, но и деятельность человека. Антропогенное воздействие на природу в Арктике особенно ощутимо, поскольку устойчивость арктических биоценозов значительно меньше, чем в более южных широтах. Главные источники загрязнения, усугубляющие экологические проблемы в арктической зоне, — добыча полезных ископаемых и транспорт. Контролю над уровнем загрязнения в Арктике уделяется большое внимание в связи с высоким биологическим эффектом этих загрязнений.

Воркутинская агломерация, расположенная в Большеземельской тундре, — яркий пример такой территории, где высока роль аэрогенного загрязнения от эмиссий промышленных предприятий. Преобладающую роль в формировании загрязнения города играют выбросы ТЭЦ, а их золы уноса являются мощными концентраторами токсичных элементов примесей, в том числе V, Zn, Cr, Hg [15]. Запылению воздуха также способствуют отвалы шахт. Ранее отмечался немалый вклад в аэрогенное загрязнение территории Воркутинской агломерации от цементного завода, расположенного в пос. Цементнозаводский [5, 7, 13].

Информацию о состоянии и степени загрязнения атмосферы можно получить не только при исследовании атмосферного воздуха непосредственно, но и при исследовании химического

состава атмосферных осадков. Для оценки состояния атмосферы в зимний период наиболее удобный объект для исследования – снежный покров, являющийся надежным индикатором интегральной оценки загрязнения атмосферы и получения информации о миграции веществ из атмосферы на поверхность, а также последующего загрязнения почвы и поверхностных вод [3]. Из-за высокой сорбционной способности снег выступает эффективным накопителем поллютантов, которые сохраняются в нем в неизменном состоянии в течение зимы (зимний период в Воркуте 7-8 месяцев). По химическому составу снега можно установить площадное распределение и количественные характеристики веществ, выпадающих из атмосферы, благодаря чему выявить источники загрязнения и ареалы их влияния, получить приближенную оценку количества токсикантов, выносимых с территории городов и промышленных площадок талыми водами и мигрирующих в почвы и подземные воды [1, 4].

На настоящий момент проведено множество исследований, направленных на определение зон влияния источников антропогенного загрязнения окружающей среды, как путем натурных исследований, так и путем моделирования ареалов загрязнения с помощью геоинформационных систем (ГИС) и анализа данных дистанционного зондирования (ДДЗ), что и было применено в настоящей работе [2, 14, 18, 19].

Советом Баренцева (Евроарктического) региона в 2013 г. был представлен экологический отчет с включенным списком “экологических горячих точек”, куда вошли несколько проблемных явлений и территорий, находящихся на территории Республики Коми. Одна из них – “Ко2”, к которой относятся цементный завод и ТЭЦ-1 (теплоэлектроцентраль), расположенные в г. Воркуте [11]. По мнению различных исследователей, объектами экологического риска является не только ТЭЦ-1, но и ТЭЦ-2, также работающая на угле [5, 8].

Приостановление работы цементного завода в 2016 г., а также предстоящая реконструкция и газификация объектов топливно-энергетического комплекса г. Воркуты (ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и центральной водогрейной котельной (ЦВК)) предопределили необходимость исследования уровня поступления загрязняющих веществ в составе снежного покрова на территорию Воркутинской агломерации.

Цель исследования – изучение поступления загрязняющих веществ с зимними атмосферными осадками на территорию Воркутинской агломерации для оценки его будущей динамики из-за изменений в эксплуатации промышленных объектов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследования относится к умеренно континентальной атлантико-арктической климатической области воркутинского климатического района, характеризуется суровой зимой и относительно прохладным летом. На данной территории в зимнее время преобладают ветра южного и юго-западного направлений.

Отбор проб снега был проведен в 2014 и 2017 гг. непосредственно на территории г. Воркуты, вблизи объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК), угольных шахт (“Воркутинская” и “Юнь-Яга”) и цементного завода. Общая схема отбора проб снежного покрова представлена на рис. 1.

Отбор проб снега в 2014 г. проводили на участках вокруг шахт “Юнь-Яга” (открытый способ добычи угля), “Воркутинская” (закрытый способ добычи) и цементного завода (п. Цементнозаводский), а также на удаленных фоновых участках. За условно фоновые территории были приняты пункты отбора проб снега, расположенные в 12-13 км на восток и юго-восток от промышленной площадки шахты “Юнь-Яга”. Объем выборки составил 18 образцов.

В 2017 г. всего была отобрана 21 проба снега на площадках с ненарушенным снежным покровом (апрель). Отбор проб снега проводили на участках вокруг объектов ТЭК: ТЭС-1 (0.5, 1.5, 2.0, 3.0 км), ТЭС-2 (0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0, 9.0 км), ЦВК (0.5, 1.0, 2.0 км) и цементного завода (п. Цементнозаводский; 0.4, 0.9 км), а также на разноудаленных фоновых участках в соответствии с характерной для данной местности розой ветров. За условно фоновые территории, где также отбирали образцы снега, были приняты участки, расположенные более чем в 20 км на восток и северо-восток от Воркуты.

Отбор снежных образцов выполняли пластиковой трубой (диаметр 4.5 см) в периоды наибольшего снегонакопления на всю глубину залегания на открытых, визуальнo ровных площадках с ненарушенным снежным покровом. В некоторых местах керны отбирались пластиковой лопатой, в связи с высокой плотностью снежного покрова. Во избежание загрязнения проб снега частицами почвы нижнюю часть кернов (1-2 см) отбрасывали. В намеченных точках с площади 8-10 м² в зависимости от глубины отбирали 3-6 снежных кернов в один общий для данной точки полиэтиленовый пакет. Таким образом, каждая точка представляет собой средний смешанный образец. Пакеты предвzарительно были тщательно промыты бидистиллятом для исключения возможной контаминации проб. Пробы взвешивали

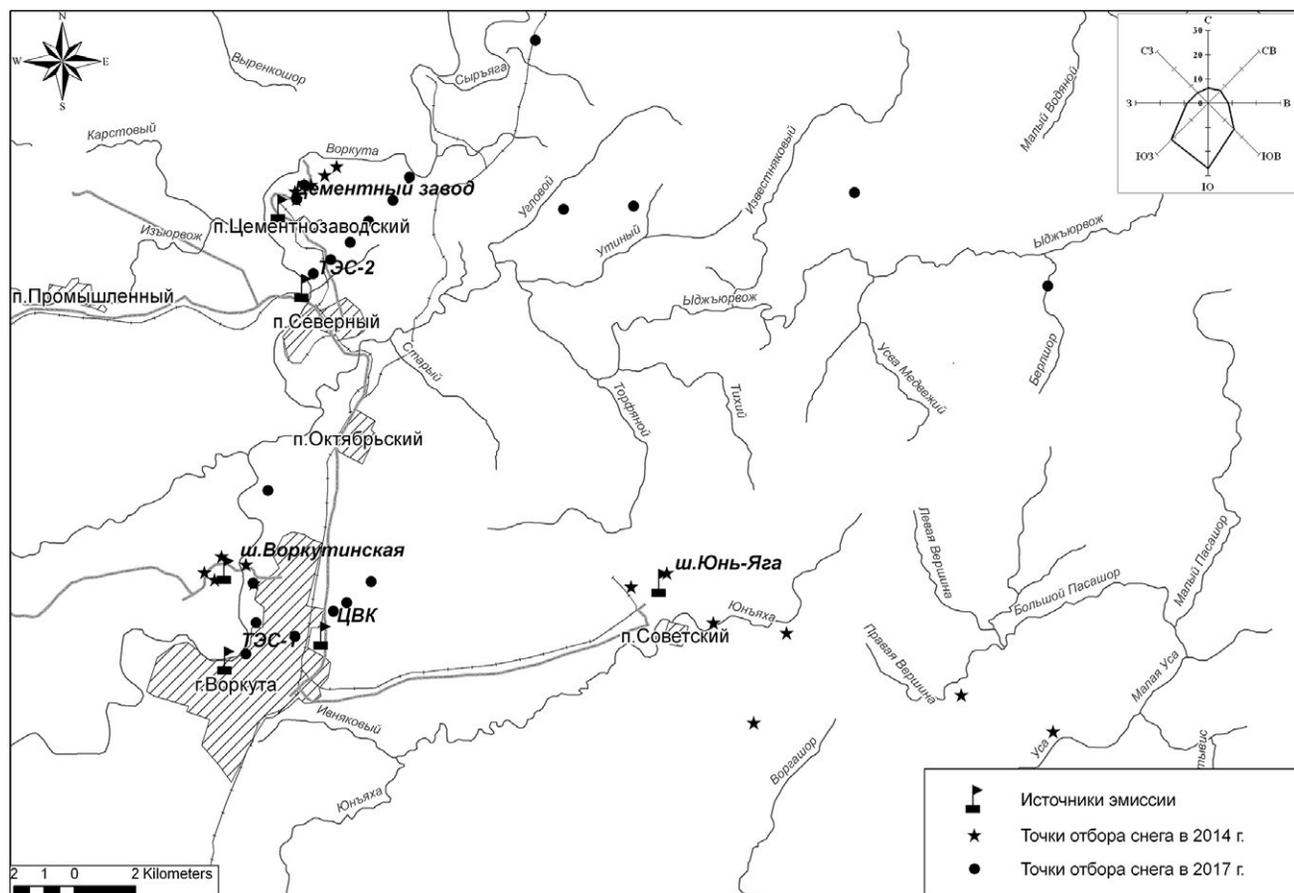


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб снежного покрова.

с точностью ± 5 г и хранили в твердом состоянии при температуре -20°C до начала анализа. Среднее значение массы проб с каждого участка отбора составило около 3.0-3.5 кг. Количественный химический анализ (КХА) образцов выполняли в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511257). Анализ элементного состава образцов проводили отдельно – в фильтрате талой воды (растворимые формы) и на фильтре (малорастворимые формы).

Все исследования, включая отбор, хранение проб снежного покрова и их химический анализ, были выполнены в соответствии с РД 52.04.186–89¹.

Для более корректной интерпретации результатов эксперимента полученные данные пересчитывали в соответствующие значения уровней поступления веществ на поверхность в $\text{г}/\text{м}^2$ или $\text{мг}/\text{м}^2$ по формулам 1 и 2 соответственно:

$$P[\text{г}/\text{м}^2] = \frac{C_m[\text{мг}/\text{дм}^3] \cdot V[\text{дм}^3]}{S[\text{см}^2] \cdot n} \cdot 10, \quad (1)$$

$$P[\text{мг}/\text{м}^2] = \frac{C_m[\text{мкг}/\text{дм}^3] \cdot V[\text{дм}^3]}{S[\text{см}^2] \cdot n} \cdot 10, \quad (2)$$

где P – масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за весь период сохранения снежного покрова; C_m – массовая концентрация компонента в талой воде; V – объем талой воды всей пробы; S – площадь внутреннего поперечного сечения трубы для отбора проб снега; n – число ядер снежного покрова, отобранных в данной точке; 10 – коэффициент для согласования размерности.

Для построения тематических цифровых карт исследуемой территории в качестве основы использовали топографические карты ГосГисЦентра (ГГЦ) масштаба 1:200000, предназначенные для открытого пользования (<http://loadmap.net>), переведенные в проекцию WGS 84, UTM. Оцифровку карт, создание карт-схем для данной работы проводили в программном пакете Arc GIS 9.2.

¹ Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. <http://docs.cntd.ru/document/902065388>.

С использованием разработанного ранее метода интерполяции на основе линейной регрессии по космическим изображениям (Landsat 8 OLI) по содержанию макро- и микрокомпонентов в снежном покрове были построены растровые изображения распределения загрязняющих веществ [2]. Для построения карт-схем распределения загрязняющих компонентов в снеге и оценки поступления веществ на изучаемую территорию использовали снимки Landsat 8 OLI для 2014 г. от 05.02.2014, для 2017 г. — от 20.05.2017. На карте-схеме нанесены границы предположительного размещения санитарно-защитных зон (СЗЗ) согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03², что соответствует 500 м от границ промплощадок для каждого рассматриваемого предприятия.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В снеге Воркуты отмечены высокие содержания взвешенных частиц вблизи ТЭЦ-2 (500 м) — до 720 мг/дм³, что в 8-9 раз превышает условно фоновые значения. Взвешенные частицы преи-

² Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. <http://docs.cntd.ru/document/902065388>.

мущественно представлены продуктами горения угля — золой, а также угольной и цементной пылью [7]. Запыленность снега пылевыми угольными частицами отмечалась также визуально при пробоотборе. Результаты элементного анализа взвеси на фильтре показали преобладание в снеге нерастворимых форм элементов — среднее значение 67%, за исключением кальция и натрия, у которых преобладают растворенные формы. При этом для железа, алюминия и хрома доля взвеси составила более 90%.

Результаты КХА проб талой воды приведены в табл. 1. Кислотность снеговой воды отражает степень техногенеза и является индикатором зон промышленного воздействия предприятий. Было установлено, что в зонах влияния угольных шахт, промплощадок объектов ТЭК и цементного завода идет подщелачивание снежного покрова.

Высокая запыленность атмосферы вблизи промышленных объектов, преобладание в выбросах соединений кальция и магния, карбонатов, дальнейшее растворение накопившейся в снежном покрове минеральной и угольной пыли приводят к возрастанию значений рН до 6.5-7.2. (рис. 2).

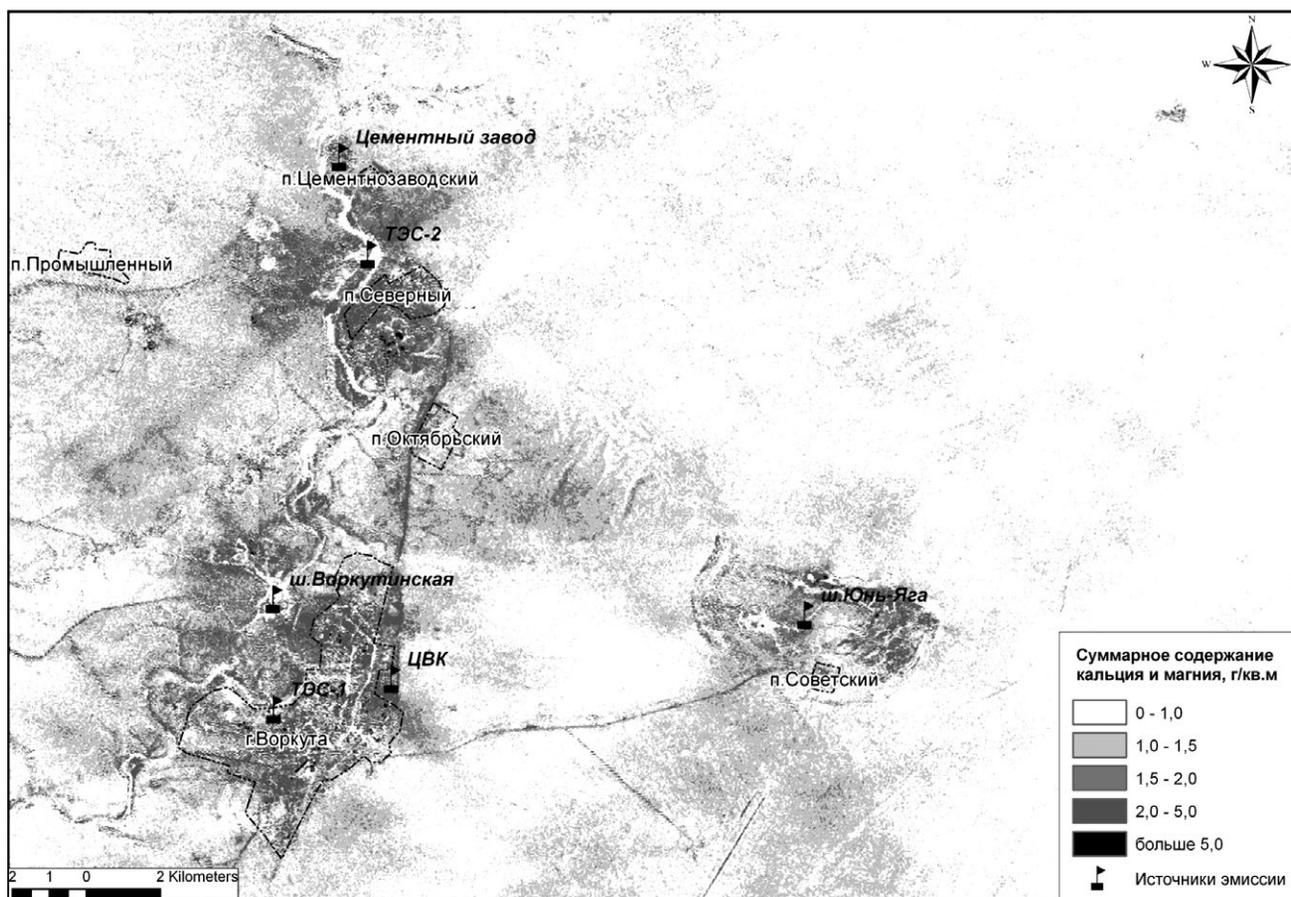


Рис. 2. Карта-схема распределения суммарного содержания кальция и магния в снеге.

Таблица 1. Средние значения содержания определяемых компонентов в талой воде импактных зон исследованных предприятий и на фоновых территориях

Компонент	Шахта Воркутинская	Шахта Юнь-Яга	Цементный завод	СЗЗ объектов ТЭК	Территория города	Фон*
pH	<u>6.7-7.0</u> ** 6.8***	<u>5.2-6.0</u> 5.6	<u>6.3-6.9</u> 6.7	<u>5.9-7.0</u> 6.5	<u>6.5-7.2</u> 6.7	5.20
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	<u>0.17-0.60</u> 0.32	<u>0.02-0.05</u> 0.03	<u>0.13-0.19</u> 0.16	<u>0.12-0.45</u> 0.27	<u>0.12-0.26</u> 0.19	0.02
N _{общ.} , мг/дм ³	<u>0.22-0.60</u> 0.38	<u>0.15-0.39</u> 0.27	<u>0.28-0.59</u> 0.47	<u>0.22-0.47</u> 0.33	<u>0.22-0.35</u> 0.29	0.20
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	<u>4.6-16.2</u> 11.3	<u>1.4-2.2</u> 1.8	<u>9.5-18.2</u> 13.0	<u>4.3-10.9</u> 6.8	<u>5.0-21.0</u> 10.9	1.2
Cl ⁻ , мг/дм ³	<u>0.28-0.50</u> 0.43	<u>0.23-0.42</u> 0.33	<u>0.24-0.74</u> 0.37	<u>0.50-0.69</u> 0.58	<u>0.50-0.60</u> 0.54	0.23
DOC****, мг/дм ³ (фильтр.)	<u>0.62-0.82</u> 0.70	<u>0.60-0.98</u> 0.80	<u>1.09-1.99</u> 1.48	<u>0.60-0.98</u> 0.87	<u>0.60-0.98</u> 0.78	0.67
S, мг/дм ³ *****	<u>0.59-1.22</u> 0.90	<u>0.19-0.67</u> 0.35	<u>0.84-1.37</u> 1.09	<u>0.66-5.50</u> 2.30	<u>0.66-0.88</u> 0.77	0.027
P, мг/дм ³	<u>0.013-0.029</u> 0.025	<u>0.010-0.020</u> 0.011	<u>0.018-0.038</u> 0.024	<u>0.010-0.020</u> 0.012	<u>0.010-0.020</u> 0.012	0.010
Na, мг/дм ³	<u>0.33-0.59</u> 0.44	<u>0.18-0.22</u> 0.20	<u>0.19-0.46</u> 0.28	<u>0.20-0.43</u> 0.28	<u>0.20-0.24</u> 0.22	0.14
Ca, мг/дм ³	<u>1.46-3.40</u> 2.26	<u>0.18-0.85</u> 0.39	<u>1.46-7.19</u> 3.6	<u>1.6-7.2</u> 3.6	<u>2.0-7.2</u> 3.6	0.09
K, мг/дм ³	<u>0.32-0.70</u> 0.48	<u>0.04-0.30</u> 0.12	<u>0.16-0.36</u> 0.27	<u>0.04-0.30</u> 0.13	<u>0.04-0.30</u> 0.07	0.03
Mg, мг/дм ³	<u>0.36-0.80</u> 0.55	<u>0.06-0.36</u> 0.14	<u>0.17-0.27</u> 0.24	<u>0.15-1.20</u> 0.50	<u>0.16-0.26</u> 0.20	0.05
Mn, мкг/дм ³	<u>10.0-21.0</u> 14.5	<u>3.5-8.0</u> 7.5	<u>4.3-13.0</u> 8.5	<u>3.3-19.0</u> 9.6	<u>2.6-3.5</u> 3.2	1.20
Cu, мкг/дм ³	<u>0.29-1.90</u> 1.40	<u>0.20-1.30</u> 0.80	<u>0.80-1.90</u> 1.40	<u>0.37-1.39</u> 0.74	<u>0.33-1.39</u> 0.72	0.20
Ni, мкг/дм ³	<u>3.5-7.3</u> 5.5	<u>0.20-3.8</u> 1.5	<u>0.70-1.8</u> 1.5	<u>1.5-18.0</u> 7.4	<u>0.8-3.7</u> 2.2	0.20
Cd, мкг/дм ³	<0.20	<u>0.20-0.26</u> 0.25	<u>0.20-0.50</u> 0.30	<0.20	<0.20	<0.20
Zn, мкг/дм ³	<u>6.0-11.6</u> 8.6	<u>4.7-10.9</u> 7.2	<u>4.9-13.0</u> 8.0	<u>0.5-4.7</u> 2.3	<u>1.4-1.9</u> 1.6	0.50
Cr, мкг/дм ³	<u>1.60-2.50</u> 2.10	<u>0.23-1.83</u> 0.70	<u>1.11-2.36</u> 1.69	<u>0.14-1.0</u> 0.44	<u>0.14-0.20</u> 0.19	0.10
Co, мкг/дм ³	<u>0.14-0.94</u> 0.57	<u>0.10-0.57</u> 0.25	<u>0.26-0.33</u> 0.30	<u>0.04-0.17</u> 0.10	<u>0.30-0.40</u> 0.035	0.10
Al, мкг/дм ³	<u>1150-2540</u> 1830	<u>100-1220</u> 420	<u>420-930</u> 780	<u>100-1220</u> 43	<u>100-1220</u> 36	31
Hg, мкг/дм ³	<u>0.20-1.14</u> 0.57	<u>0.01-0.25</u> 0.10	<u>0.02-1.0</u> 0.28	<u>0.025-0.33</u> 0.13	<u>0.025-0.44</u> 0.03	<0.01
V, мкг/дм ³	<u>5.3-10.9</u> 8.3	<u>1.0-5.0</u> 2.0	<u>3.5-5.4</u> 4.7	<u>6.0-41.0</u> 17.8	<u>4.6-23.0</u> 10.0	<1.0
Нефтепродукты, мг/дм ³	-	-	-	<u>0.005-0.057</u> 0.036	<u>0.020-0.440</u> 0.139	0.009

* – условно фоновая территория;

** – диапазон минимального и максимального значений показателя;

*** – среднее значение показателя для данной территории;

**** – растворенный органический углерод;

***** – суммарное содержание элементов на фильтре и в фильтрате.

На фоновых территориях тундровой зоны среднее значение водородного показателя составляет 5.0-5.2. Значимые коэффициенты корреляции r свидетельствуют о том, что ионы магния поступают в снежный покров в основном в виде гидрокарбонатов и сульфатов ($r_{\text{Mg-HCO}_3^-} = 0.81-0.87$, $r_{\text{Mg-SO}_4^{2-}} = 0.71-0.97$); ионы кальция – в виде сульфатов и гидрокарбонатов. Ионы натрия находятся в содстве с хлорид-ионами ($r_{\text{Na-Cl}^-} = 0.94$), кратность содержания над фоновым уровнем в СЗЗ объектов ТЭК и на территории города составила 2-3.

Нужно отметить, что в пределах импактных зон предприятий отмечено высокое поступление кальция. Так, кратность поступления кальция над фоновым уровнем возле цементного завода достигала 80 в 2014 г., в СЗЗ ТЭЦ-2 – более 200, что определяет высокое содержание обменного кальция в почвах Воркутинской агломерации [7].

Наибольшее значение имеет оценка поступления тяжелых металлов, многие из которых весьма токсичны. Содержание меди и марганца в импактных зонах превышает фоновое в 3-10 раз. Поступление никеля, хрома, кобальта и алюминия в ряде пунктов отбора превышает фоновый

уровень более чем в 20 раз. В снеге фоновых территорий содержание кадмия очень низкое, однако при сравнении содержания этих элементов в импактных зонах со значениями предела обнаружения методик количественного анализа кратности составляют 2-3.

При очерчивании ареалов загрязнения весьма наглядна карта-схема распределения ванадия в снеге (рис. 3). Ванадий – элемент-индикатор угольной пыли и золы, т.е. основных агентов загрязнения данной территории. Поступление этого компонента происходит достаточно локально, поскольку частицы, в которых он находится, оседают рядом с источниками эмиссии.

Максимальные содержания ванадия в снеге были отмечены в 2017 г. возле ЦВК и ТЭЦ-2. Кратности превышения содержания над фоновым уровнем достигали 300 и более. Возле ЦВК также отмечены повышенные концентрации никеля и нефтепродуктов, что обусловлено тем, что ЦВК работает на мазуте. Так, согласно литературным данным, нефтепродукты, в том числе мазут, имеют высокое содержание как ванадия, так и никеля [10]. Наибольшее содержание нефтепродуктов

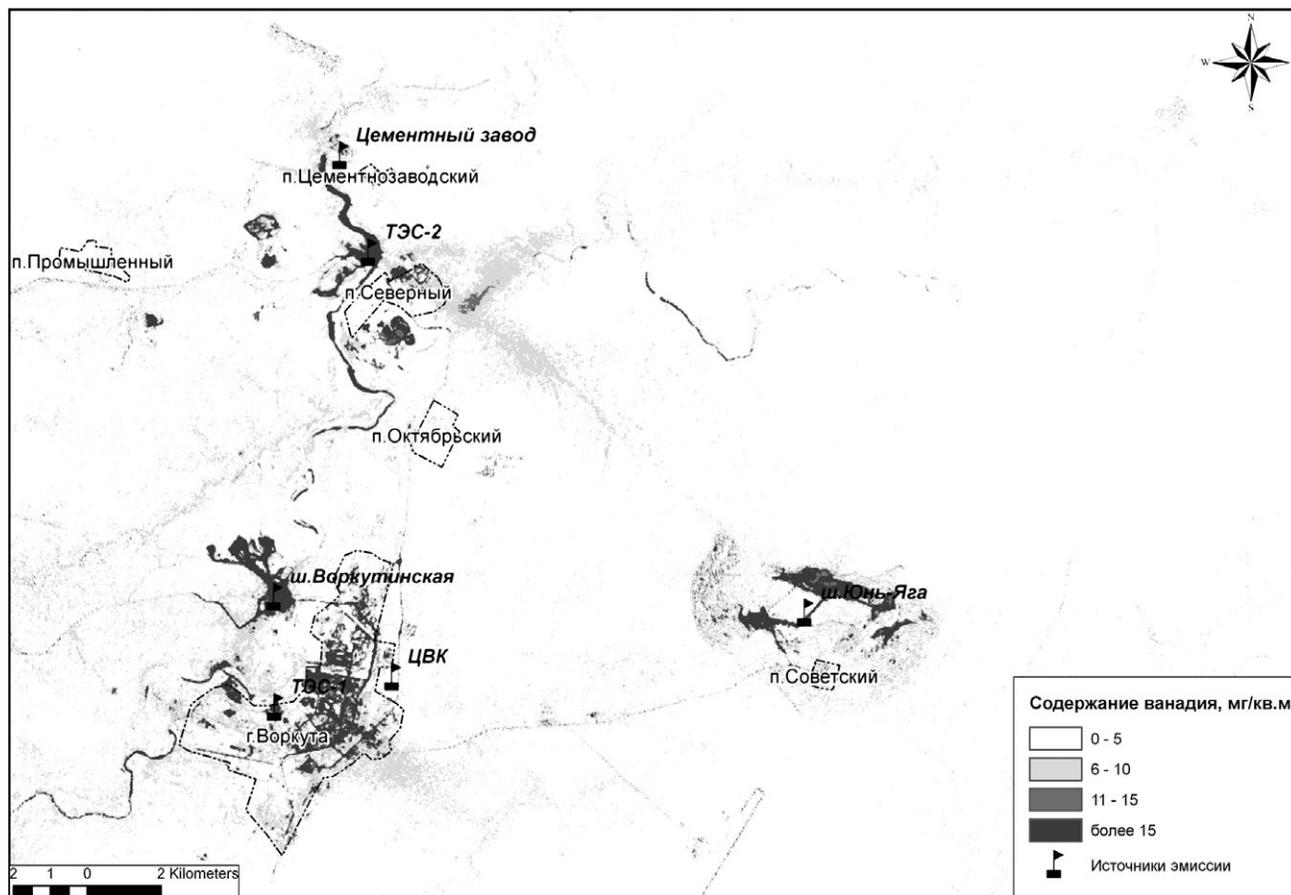


Рис. 3. Карта-схема распределения содержания ванадия в снеге в растворенной форме (фильтрат).

в снеге отмечено на территории города и вблизи ЦВК, где высока вероятность попадания их в окружающую среду от транспорта и эксплуатации котельной [6].

Однако наиболее важным в исследовании было обнаружение в снеге Воркуты ртути – наиболее токсичного из рассматриваемых компонентов. В некоторых пунктах отбора вблизи ТЭЦ-2 содержание ртути превышает фоновый в 100 и более раз. Максимальные значения содержания ртути в снеге были отмечены в 2014 г. и относились к территории вблизи цементного завода, работа которого в настоящее время приостановлена, а также вокруг шахты “Воркутинская”. В большинстве пунктов исследования содержание ртути превышало предельно допустимое значение для вод рыбохозяйственного назначения ($\text{ПДК}_{\text{рх}} = 0.01 \text{ мкг/дм}^3$) (рис. 4). Присутствие ртути в снеге воркутинских промышленных территорий, по нашему мнению, связано со сжиганием угля на ТЭЦ и эмиссией в атмосферу Hg^0 , фотохимической трансформацией в форму Hg^{2+} , а также с окислением Hg^0 транзитными газами, сорбцией ионов ртути на поверхности углеродистых микрочастиц (менее 2 мкм) [16], последую-

щим сухим или влажным вымыванием из атмосферы и аккумуляцией в снежной толще [19].

Для таких показателей, как марганец, никель, алюминий, молибден, ванадий, также наблюдалось превышение нормативов $\text{ПДК}_{\text{рх}}$ в СЗЗ объектов теплоэнергетики. Значения соответственно составили 1.9 ПДК , 1.8 ПДК , 2.7 ПДК , 3 ПДК , 40 ПДК .

Для выявления механизмов поступления поллютантов и факторов формирования химического состава снежного покрова был применен факторный анализ. Результаты факторного анализа содержания компонентов в растворяемой фракции талых вод представлены в табл. 2.

Первый фактор сформирован компонентами, распространение которых полностью зависит от присутствия угольной пыли и зол уноса от ТЭЦ. В данную группу вошло большинство анализируемых компонентов. Во вторую группу вошли органический углерод, а также ванадий и никель. Этот состав веществ может, предположительно, образовываться при сжигании нефтепродуктов. Результаты расчета третьего фактора дублируют второй. Четвертый фактор представлен наибольшими вкладами кадмия и цинка, что, возможно,

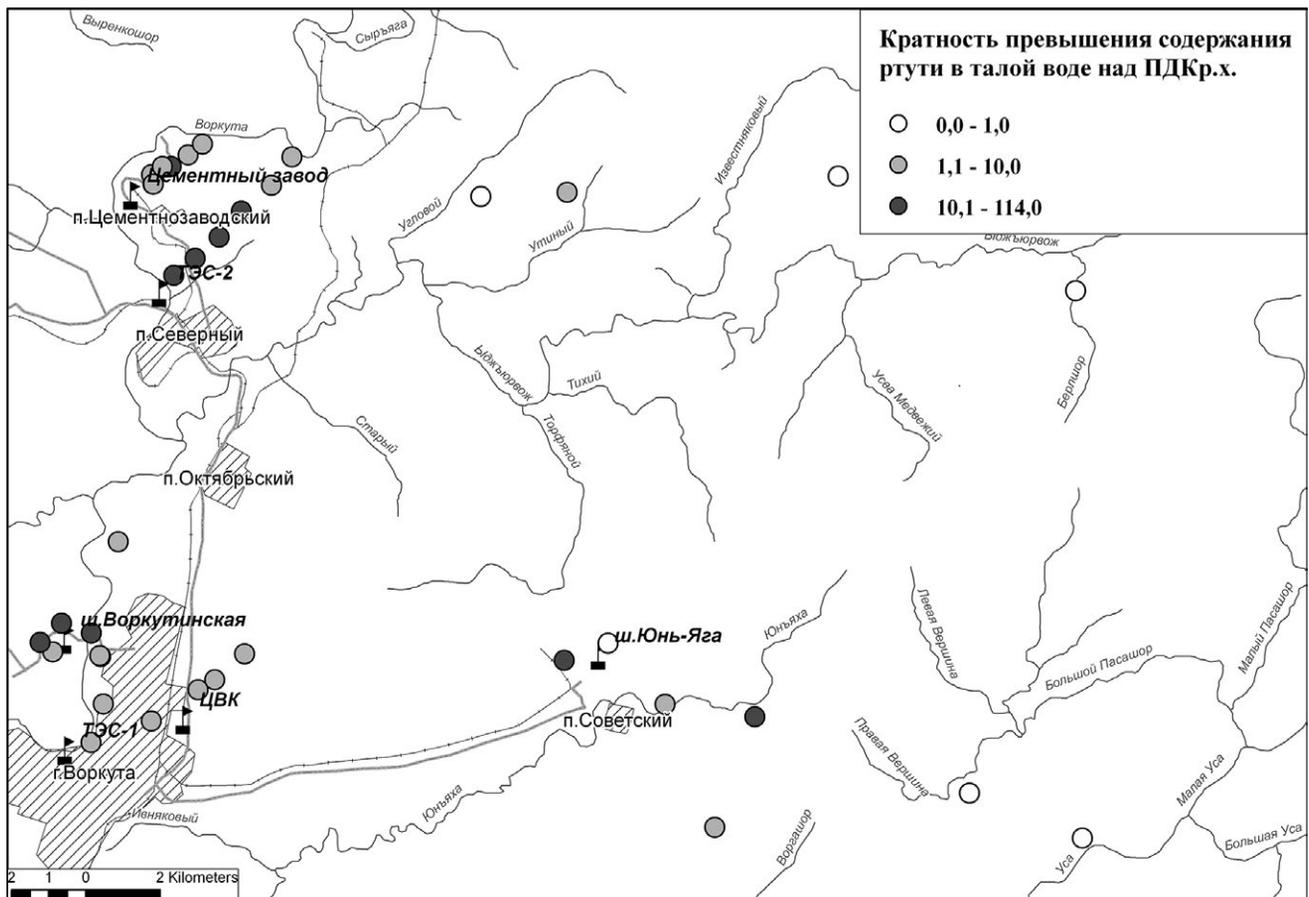


Рис. 4. Содержание ртути в снеге г. Воркуты.

Таблица 2. Результаты факторного анализа валового содержания компонентов снежного покрова

Компонент	Номер фактора, F							$\sum_{f=1}^F r(X)_f^2$
	1	2	3	4	5	6	7	
	факторный вес компонента, r^2							
pH	0.11	0.36	0.24	0.00	0.17	0.00	0.05	1.0
HCO ₃ ⁻	0.54	0.10	0.14	0.00	0.08	0.02	0.05	1.0
NH ₄ ⁺	0.92	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	1.0
TN	0.86	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.05	1.0
NO ₃ ⁻	0.57	0.18	0.08	0.02	0.04	0.00	0.00	1.0
DOC	0.00	0.27	0.19	0.19	0.01	0.23	0.02	1.0
Cl ⁻	0.67	0.10	0.09	0.01	0.02	0.00	0.02	1.0
SO ₄ ²⁻	0.97	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0
P	0.58	0.10	0.00	0.02	0.19	0.00	0.00	1.0
S	0.89	0.05	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	1.0
Al	0.86	0.06	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	1.0
Ca	0.86	0.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	1.0
Cd	0.20	0.12	0.04	0.24	0.03	0.15	0.09	1.0
Co	0.70	0.00	0.00	0.01	0.12	0.02	0.04	1.0
Cr	0.93	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	1.0
Cu	0.45	0.16	0.18	0.01	0.04	0.00	0.02	1.0
K	0.86	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	1.0
Mg	0.89	0.04	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	1.0
Mn	0.88	0.02	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	1.0
Na	0.90	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	1.0
Ni	0.04	0.48	0.28	0.12	0.03	0.02	0.02	1.0
V	0.14	0.41	0.30	0.11	0.00	0.01	0.01	1.0
Zn	0.03	0.15	0.00	0.37	0.00	0.31	0.09	1.0
Hg	0.13	0.16	0.09	0.19	0.05	0.11	0.20	1.0
Суммарный вес каждого фактора	14.0	2.9	1.7	1.4	1.0	0.9	0.7	~24
Относительный суммарный вес каждого фактора, %	59.6	12.3	7.4	5.8	4.3	3.9	3.1	~100

объясняется тем, что они являются химическими элементами-аналогами, физико-химические свойства которых во многом сопоставимы. Имеется информация о сходстве процессов распределения этих микроэлементов в окружающей среде [9].

В шестом факторе наибольшие факторные нагрузки отмечаются для общего органического углерода и цинка. Значимый вклад в данный фактор этих компонентов, предположительно, обусловлен возможной высокой степенью сорбции цинка на органическом веществе, а также возможным высокотемпературным восстановлением оксида цинка на поверхности сажевых частиц при сжигании угля [12].

Ртуть образует отдельно от других элементов седьмой фактор (наибольший факторный вес),

что может быть обусловлено особенностями ее поступления и миграции, а также, вероятно, наибольшей лабильностью ее форм в атмосферном воздухе. Исследователи отмечали особый характер поведения ртути в импактных зонах предприятий, сжигающих уголь и бытовые отходы [17].

Для оценки степени аэротехногенной нагрузки использовали расчеты суммарного индекса загрязнения снежного покрова (Z_p) (рис. 5). Данный показатель может рассматриваться как характеристика влияния выбросов предприятия на здоровье населения, которое определяется по соответствующей шкале³. Так, значения суммар-

³ ГН 2.1.7.2042-06. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. http://snipov.net/c_4655_snip_109921.html.

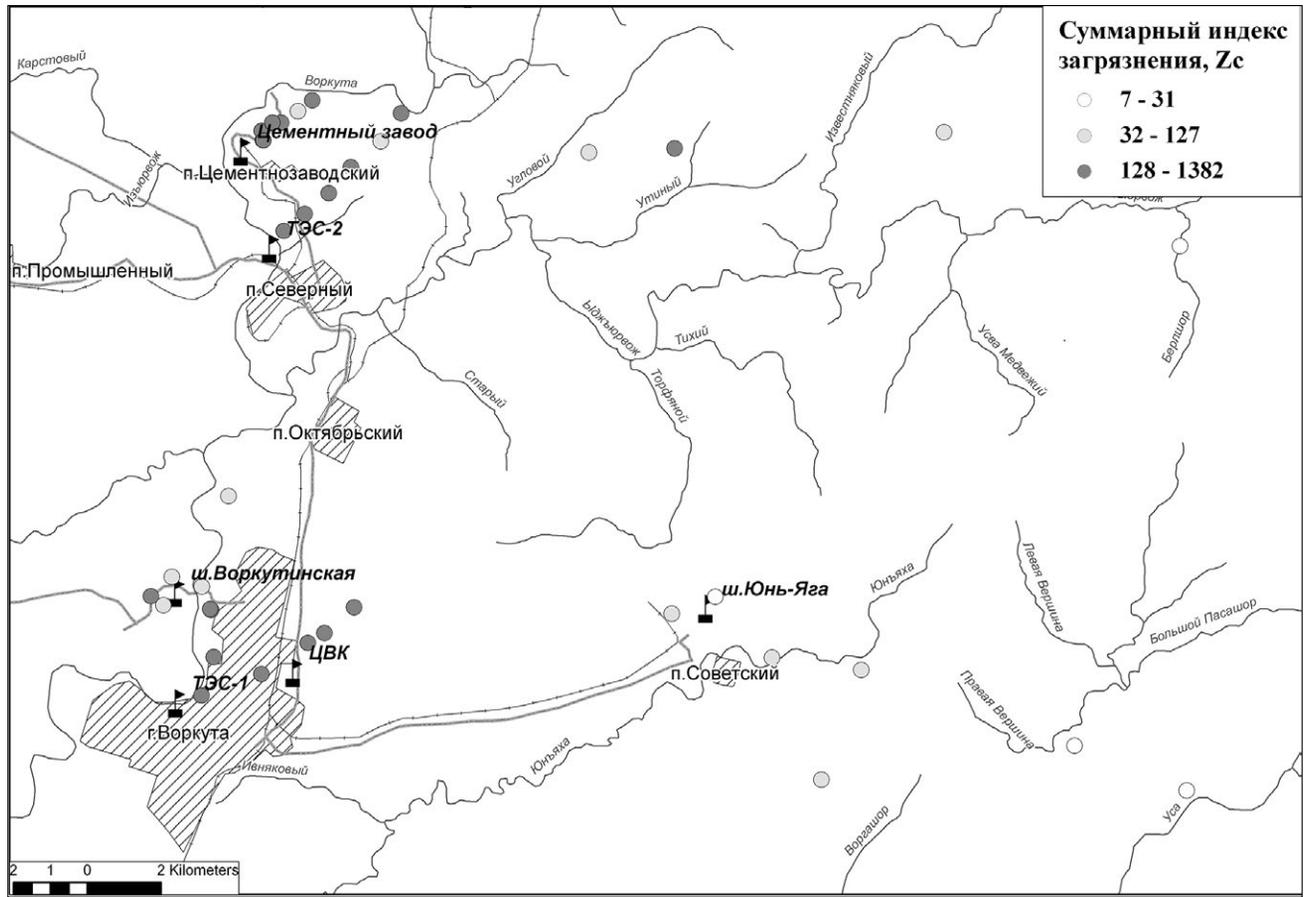


Рис. 5. Распределение значений суммарного индекса загрязнения снежного покрова.

ного индекса загрязнения $Z_c > 32$ указывают на увеличение риска заболеваемости населения.

Полученное среднее распределение в снежном покрове значений суммарного индекса загрязнения позволило выделить области возможного наибольшего влияния выбросов на здоровье населения. Согласно полученным значениям Z_c , загрязнение от предприятий Воркуты распространяется примерно на 10 км на северо-восток. Наиболее сильное загрязнение территории ($Z_c > 128$), относящееся к категории чрезвычайно опасного, отмечается в точках, расположенных в городской черте и на разном удалении от ТЭЦ-2. Так, на территории вблизи ТЭЦ-2 отмечены максимальные значения Z_c , достигающие более 1000. Значительно меньшее, но достаточно существенное воздействие, согласно индексу загрязнения, наблюдалось в черте города и импактной зоне ТЭЦ-1, а также в 2014 г. при работающем цементном заводе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дана оценка химического состава снежного покрова территории Воркутинской агломерации. Талые воды с территории города и промышленных

объектов имеют щелочную реакцию. Это связано с тем, что основные макрокомпоненты загрязнения – соединения кальция – преимущественно гидрокарбонаты, обуславливающие подщелачивание.

Кратности содержания в снеге микроэлементов по отношению к фоновым значениям достигают десятков и сотен, что указывает на существенный вклад этих поллютантов в загрязнение исследованной территории.

Высокая запыленность атмосферы в городе определяет высокое содержание взвешенных частиц в снеге. Сепарационный анализ фракций талой воды показал, что доля веществ на взвешенных частицах составляет более 60% от общего объема поступления.

Наиболее сильное воздействие, выраженное в высоком поступлении поллютантов, отмечено вблизи ТЭЦ-2, что подтверждает более ранние исследования загрязнения компонентов окружающей среды в г. Воркуте.

Весьма опасным компонентом загрязнения Воркутинской агломерации выступает ртуть, поступление которой связано со сжиганием угля на ТЭЦ.

Основное загрязнение создают угольная пыль и зола, присутствующие повсеместно на территории Воркутинской агломерации, содержащие в своем составе практически все определяемые химические компоненты. Таким образом, ртуть и ванадий выступают маркерами загрязнения данной территории.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания №г.р. ААА-А-А17-117120140139-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василевич М.И., Безносиков В.А., Кондратенко Б.Н. Химический состав снежного покрова на территории таежной зоны Республики Коми // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 494-506.
2. Василевич М.И., Шанов В.М., Василевич Р.С. Применение спутниковых методов исследований при оценке загрязнения снежного покрова вокруг промышленных предприятий в тундровой зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 50-60.
3. Василенко В.Н., Наумов И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 181 с.
4. Виноградова А.А. Атмосферный перенос антропогенных примесей в Центральную часть Российской Арктики // Экологическая химия. 1996. № 5(1). С. 3-10.
5. Воркута – город на угле, город в Арктике: Науч.-популяр. издание / Под ред. М.В. Гецен. Сыктывкар: Респ. экологический центр РК, 2004. 352 с.
6. Габов Д.Н., Яковлева Е.В., Василевич М.И., Василевич Р.С. Накопление полициклических ароматических углеводородов в снежном покрове вблизи предприятий топливно-энергетического комплекса вокруг г. Воркута // Геоэкология. 2019. № 1. С. 24-37.
7. Гецен М.В., Стенина А.С., Хохлова Л.Г., Русанова Г.В. и др. Состояние природной среды Большеземельской тундры на территории Воркутинского промышленного района // Народное хозяйство Республики Коми, 1994. Т. 3. № 1. С. 68-75.
8. Гецен М.В., Патова Е.Н., Кулюгина Е.Е., Истомина Л.Н. и др. Трансформация природной среды тундры в условиях открытой добычи угля // Север: арктический вектор социально-экологических исследований. Сыктывкар, 2008. С. 183-196.
9. Ладонин Д.В. Конкурентные взаимоотношения ионов при загрязнении почвы тяжелыми металлами // Почвоведение. 2000. №10. С.1285-1293.
10. Пуланова С.А. Особенности накопления в нефтидах ванадия и никеля // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 3 (22). С. 1-13.
11. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: экология и экономика. 2013. №2 (10). С. 18-27.
12. Умланд Ф., Янсен А, Тириг Д., Вюни Г. Комплексные соединения в аналитической химии. Теория и практика применения. М.: Химия, 1975. 532 с.
13. Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Рязанов М.А., Казаков В.Г. Состояние снежного и почвенного покрова вблизи цементного завода // Вода: химия и экология. 2010. № 10. С. 46-51.
14. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В. и др. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосферы и океана. 2000. № 6-7. С. 551-575.
15. Юдович Я.Э., Золотова В.В. Элементы примеси в углях Печорского бассейна // Народное хозяйство Республики Коми. 1994. Т. 3. № 1. С. 16-26.
16. Capri A. Mercury from combustion sources: A review of the chemical species emitted and their transport in the atmosphere // Water Air Soil Pollution. 1997. V. 98. № 3. P. 241-254.
17. Chiardia M., Cupelin F. Gas-to-particle conversion of mercury, arsenic and selenium, through reactions with traffic-related compounds (Geneva). Indication from lead isotopes // Atmospheric Envir. 2000. V. 34. P. 327-332.
18. Devyatova A.Y., Yurkevich N.V., Raputa V.F. Predictive models of air pollution from anthropogenic sources by the snow cover study // Proc. of the 3rd Int. SEMEPE & SECOTOX Conference. Skiathos. June 19-24, 2011. P. 577-582.
19. Kokhanovsky A. Spectral reflectance of solar light from dirty snow: a simple theoretical model and its validation // Cryosphere. 2013. № 7. P. 1325-1331.

REFERENCES

1. Vasilevich, M.I., Beznosikov, V.A., Kondratenok, B.N. *Khimicheskii sostav snezhnogo pokrova na territorii taezhnoi zony Respubliki Komi* [Chemical composition of snow cover in the taiga zone of the Komi Republic]. *Vodnye resursy*, 2011, vol. 38, no. 4, pp. 494-506. (in Russian)
2. Vasilevich, M.I., Shchanov, V.M., Vasilevich, R.S. *Primenenie sputnikovykh metodov issledovaniy pri otsenke zagryazneniya snezhnogo pokrova vokrug promyshlennykh predpriyatii v tundrovoi zone* [Application of satellite research methods in the assessment of snow cover pollution around industrial enterprises in the tundra zone]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015, vol. 12, no. 2, pp. 50-60. (in Russian)

3. Vasilenko, V.N., Naumov, I.M., Fridman, Sh.D. *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 181 p. (in Russian)
4. Vinogradova, A.A. *Atmosfernyi perenos antropogennykh primesei v Tsentral'nyuyu chast' Rossiiskoi Arktiki* [Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Central part of the Russian Arctic]. *Ekologicheskaya khimiya*, 1996, no. 5(1), pp. 3-10. (in Russian)
5. *Vorkuta - gorod na ugle, gorod v Arktike: Nauch.-populyar. izdanie* [Vorkuta is a city on the coal, a city in the Arctic]. Getsen, M.V., Ed., Syktyvkar, Resp. ekologich. Tsentr RK, 2004, 352 p. (in Russian)
6. Gabov, D.N., Yakovleva, E.V., Vasilevich, M.I., Vasilevich, R.S. *Nakoplenie politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodov v snezhnom pokrove vblizi predpriyatii toplivno-energeticheskogo kompleksa vokrug g.Vorkuta* [Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover near the enterprises of fuel and energy complex around Vorkuta]. *Geoekologiya*, 2019, no. 1, pp. 24-37. (in Russian)
7. Getsen, M.V., Stenina, A.S., Khokhlova, L.G., Rusanova, G.V., et al. *Sostoyanie prirodnoi sredy Bol'shezemel'skoi tundry na territorii Vorkutinskogo promyshlennogo raiona* [The state of the natural environment of the Bolshezemel'skaya tundra in the territory of the Vorkuta industrial district]. *Narodnoe khozyaistvo Respubliki Komi*. 1994, vol. 3, no. 1, pp. 68-75. (in Russian)
8. Getsen, M.V., Patova, E.N., Kulyugina, E.E., Istomina L.N., et al. *Transformatsiya prirodnoi sredy tundry v usloviyakh otkrytoi dobychi uglya* [The transformation of the natural tundra environment upon open coal mining]. *Sever: arkticheskii vektor sotsial'no-ekologicheskikh issledovaniy*. Syktyvkar, 2008, pp. 183-196. (in Russian)
9. Ladonin, D.V. *Konkurentnye vzaimootnosheniya ionov pri zagryaznenii pochvy tyazhelymi metallami* [Competitive relationships of ions in soil contamination with heavy metals]. *Pochvovedenie*, 2000, no. 10, pp.1285-1293. (in Russian)
10. Puanova, S.A. *Osobennosti nakopleniya v neftidakh vanadiya i nikelya* [Specific features of vanadium and nickel accumulation in oil]. *Aktual'nye problemy nefti i gaza*, 2018, no. 3 (22), pp.1-13.
11. Sokolov, Yu.I. *Arktika: k probleme nakoplenno ego ekologicheskogo ushcherba* [The Arctic: the problem of accumulated environmental damage]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2013, no. 2 (10), pp. 18-27. (in Russian).
12. Umland, F., Yansen, A, Tirig, D., Vyunsh, G. *Kompleksnye soedineniya v analiticheskoi khimii. Teoriya i praktika primeneniya*. [Complex compounds in analytical chemistry. Theory and practice of application.]. Moscow, Khimiya, 1975, 532 p. (in Russian).
13. Shamrikova, E.V., Vanchikova, E.V., Ryazanov, M.A., Kazakov, V.G. *Sostoyanie snezhnogo i pochvenno go pokrova vblizi tsementnogo zavoda* [State of snow and soil cover near the cement plant]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2010, no. 10, pp. 46-51. (in Russian)
14. Shevchenko, V.P., Lisitsyn, A.P., Vinogradova, A.A., Smirnov, V.V., Serova, V.V., Shtain, R. *Aerozoli Arktiki – rezul'taty desyatiletnikh issledovaniy* [Arctic aerosols as the results of ten-year-long studies]. *Optika atmosfery i okeana*, 2000, no. 6-7, pp. 551-575. (in Russian)
15. Yudovich, Ya.E., Zolotova, V.V. *Elementy primesi v uglyakh Pechorskogo basseina* [Trace elements in coals of the Pechora basin]. *Narodnoe khozyaistvo Respubliki Komi*. 1994, vol. 3, no. 1, pp. 16-26. (in Russian)
16. Capri, A. Mercury from combustion sources: A review of the chemical species emitted and their transport in the atmosphere. *Water Air Soil Pollution*, 1997, vol. 98, no. 3, pp. 241-254.
17. Chiardia, M., Cupelin, F. Gas-to-particle conversion of mercury, arsenic and selenium, trough reactions with traffic-related compounds (Geneva). Indication from lead isotopes. *Atmospheric Environment*, 2000, vol. 34, pp. 327-332.
18. Devyatova, A.Y., Yurkevich, N.V., Raputa, V.F. Predictive models of air pollution from anthropogenic sources by the snow cover study. Proc. of the 3rd International CEMEPE & SECOTOX Conference. Skiathos, June 19-24, 2011.
19. Kokhanovsky, A. Spectral reflectance of solar light from dirty snow: a simple theoretical model and its validation. *Cryosphere*, 2013, no. 7, pp. 1325-1331.

EVALUATION OF AERIAL TECHNOGENIC POLLUTION NEAR INDUSTRIAL ENTERPRISES IN THE TUNDRA ZONE (BY THE EXAMPLE OF VORKUTA CITY)

© 2019 M. I. Vasilevich^{1,*}, R. S. Vasilevich¹, D. N. Gabov¹, B. M. Kondratenok¹

¹*Institute of Biology, Komi Scientific Center, the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya 28, Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russia*

**E-mail: mvasilevich@ib.komisc.ru*

The quantitative chemical analysis of snow cover has been carried out for the Vorkuta agglomeration territory. The on-site ingress of pollutants in close proximity to industrial enterprises in Vorkuta is calculated. The schematic maps of substance distribution in snow in the studied area are built using space images. The control levels of aerotechnogenic pollution are established for the city, industrial zones and adjacent territories for the purpose of subsequent ecological monitoring. The pH value of snowmelt water reaches 6.5-7.2 due to a high content of alkaline components (calcium and magnesium carbonates) in snow. The snow cover of the Vorkuta agglomeration is highly enriched with heavy metals. The maximum permissible concentrations are exceeded for manganese, nickel, aluminum, vanadium, molybdenum and mercury. High concentrations of mercury in snow are supposedly related to coal combustion at the thermal power plant. After that mercury may be occluded on a surface of coal particles and ashes. It is shown that it is possible to establish the zones of the greatest aerogenic impact according to the content of mercury and vanadium in the snow. Factor analysis was used to identify the mechanisms of pollutants and factors forming the chemical composition of the snow cover. The share of elements in the suspended solids is more than 60% of their total content in snowmelt water. High concentrations of suspended particles (up to 720 mg/dm³) were observed in the snow of Vorkuta. The most severe pollution of the snow cover is registered in close proximity to thermal power plant №2. According to the calculations of the total pollution index, the highest excess of substance increment over the background level was noted in the sanitary protection zone around the thermal power plant №2.

Keywords: *snow, aerogenic pollution, tundra zone, Vorkuta agglomeration, ecological and chemical monitoring.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019694-105>