

УДК 551.510.04

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ РОССИЙСКОГО ЗАПОЛЯРЬЯ

Семенец Елена Сергеевна¹,
elena573s@yandex.ru

Свистов Петр Филиппович¹,
svistov.pf@gmail.com

Талаш Александр Сергеевич²,
aleksandr.talash@gmail.com

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.

² Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России,
Россия, 109012, г. Москва, ул. Ватутина, 1.

Актуальность изучения химического состава атмосферных осадков обусловлена необходимостью контроля процессов миграции и трансформации загрязняющих веществ, определяющих нагрузку на подстилающую поверхность.

Целью данной работы является обобщение результатов измерений основных макро- и микропоказателей химического состава атмосферных осадков Российского Заполярья за период времени с 2007 по 2015 гг., включая результаты, полученные в ходе совместной программы Федерального государственного бюджетного учреждения Арктического и антарктического научно-исследовательского института и Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» на ледовой станции СП-35 в 2007–2008 гг.

Методы исследования: теоретический анализ, сопоставление и обобщение имеющихся данных наблюдений.

Результаты. При самой низкой минерализации содержание микроэлементов (тяжелых металлов) составило около 12 %. Повышенное содержание тяжелых металлов в Центральной Арктике наблюдается и при более высокой сумме ионов, а максимальная кислотность атмосферных осадков соответствует величине $pH=4,7$. Полученные значения концентраций тяжелых металлов (свинца и кадмия) в атмосферных осадках ледовой станции СП-35 не превышали среднегодовые фоновые концентрации.

Выводы. Причины повышенного содержания тяжелых металлов в пробах атмосферных осадков остаются практически неясными. Очевидна настоятельная необходимость не только продолжить, но и организовать по специальной программе регулярные наблюдения за кислотностью и химическим составом атмосферных осадков на акватории Северного Ледовитого океана. При этом следует расширить перечень компонентов, анализируемых в атмосферных осадках, включив в него тяжелые металлы.

Ключевые слова:

Природные условия, атмосферные осадки, химический состав, кислотность, окружающая среда, влажные выпадения, региональный фон.

Введение

Арктический бассейн служит прекрасным воздушным фильтром северного полушария Земли, очищая атмосферу по одним компонентам и перераспределяя загрязнение воздуха по другим [1]. Отличительной особенностью окружающей среды арктического региона является ее уязвимость, которая определяется воздействием на нее процессов миграции и трансформации загрязняющих веществ [2]. В этой связи изучение химического состава атмосферных осадков приобретает немаловажное значение. Химический состав атмосферных осадков является не только интегральной характеристикой содержания примесей в облачном и подоблачном слое атмосферы, но и индикатором переноса примесей на значительные расстояния [3]. К числу факторов, влияющих на химический состав атмосферных осадков на территории Российского Заполярья, относят морскую поверхность и перенос воздушных масс из промышленно-развитых регионов России, Северной и Центральной Ев-

ропы. В составе атмосферных осадков, как правило, преобладают водорастворимые сульфаты и хлориды щелочных и щелочно-земельных металлов [2]. В виде ничтожной, но постоянно присутствующей примеси в осадках находятся тяжелые металлы. Их происхождение до конца не выяснено. Общепринято, что повышенное содержание ряда тяжелых металлов в атмосферных осадках свидетельствует о наличии техногенных источников загрязнения [4]. Однако на значительном удалении от промышленных центров концентрации тяжелых металлов в атмосферных осадках могут определяться и природными факторами. В любом случае атмосферные осадки, являясь важным источником поступления не только морских солей, но и тяжелых металлов, вносят существенный вклад в цикл биогеохимических процессов Арктики [2].

Таким образом, цель данной работы заключалась в выявлении особенностей в химическом составе атмосферных осадков на территории Российского Заполярья.

Материалы и методы исследования

В настоящее время на территории Российского Заполярья расположены 22 станции, в программу наблюдений которых входит отбор проб атмосферных осадков для последующего определения химического состава и кислотности [5]. В рамках национальной программы мониторинга химизма и кислотности атмосферных осадков в месячных пробах определяются 11 главных показателей. К ним относятся: удельная электропроводность (k), величина кислотности (pH), а также содержание основных ионов – гидрокарбонат-, хлорид-, сульфат-, нитрат-ионов, ионов аммония, калия, натрия, магния и кальция. В суточных (или единичных) пробах атмосферных осадков определяется только показатель pH .

По общности атмосферных процессов и другим природным показателям регион Российского Заполярья принято разделять на три сектора [6]:

- Атлантический (от западной границы до предгорий Полярного Урала), на территории которого расположены станции Зареченск, Падун, Мурманск, Краснощелье, Мудьюг, Архангельск, Северодвинск, Онега, Сура, Ухта и Нарьян-Мар;
- Сибирский (восточнее Полярного Урала до северной части бассейна реки Лены) с пунктами наблюдений Уренгой, Диксон, Туруханск, Норильск, Полярный, Жиганск, Кюсюр, Тикси;
- Тихоокеанский с пунктами Депутатский, Усть-Мома и Палатка.

Следует отметить, что некоторые станции расположены значительно южнее Полярного круга, а деление на географические районы часто бывает условным и не всегда совпадает с делением на климатические области.

В течение 2007–2008 гг. в рамках совместной программы Федерального государственного бюджетного учреждения Арктического и антарктического научно-исследовательского института и Федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» были организованы отборы проб на ледовой станции СП-35. Начало наблюдений было положено в июле 2007 г. В летний период 2007 г. отбирались пробы отдельных выпадений осадков (единичные пробы) на Ледовой базе (ЛБ-35). В течение осенне-зимнего периода (октябрь 2007 г. – март 2008 г.) отбирались месячные пробы атмосферных осадков на дрейфующей льдине СП-35. Все пробы отбирались по методике, принятой для российских станций, осуществляющих регулярные наблюдения за химическим составом атмосферных осадков. Помимо 11 главных показателей в пробах анализировалось также содержание тяжелых металлов – железа, цинка, никеля, марганца, меди, свинца, хрома и кадмия.

Траектория дрейфа СП-35 проходила в пределах абиссальной равнины Баренца (котловина Нансена) от точки $81^{\circ}27'N$ $115^{\circ}19'E$ до точки $81^{\circ}15'N$ $29^{\circ}15'E$. В течение 284 дней с 21.09.2007

по 30.06.2008 г. в автономном режиме станция прошла 2422 км со средней скоростью 8,5 км/сутки. Льдина начинала свой путь от северо-восточного побережья Северной Земли и двигалась в северо-западном, затем в западном направлении (к Земле Франца-Иосифа).

Таким образом, были обработаны ежемесячные данные о химическом составе атмосферных осадков 22-х станций Российского Заполярья за период времени с 2007 по 2015 гг. Также были проанализированы ежемесячные и единичные данные о химическом составе атмосферных осадков на Ледовой базе (ЛБ-35) и дрейфующей льдине СП-35 в течение осенне-зимнего периода 2007–2008 гг.

Средние за год значения концентраций основных веществ в химическом составе атмосферных осадков рассчитывались либо как среднеарифметические концентрации, либо как средневзвешенные годовые концентрации. Средневзвешенные концентрации ионов в лучшей степени, чем среднеарифметические, отражают среднюю концентрацию ионов в годовой сумме осадков и среднюю годовую нагрузку на подстилающую поверхность, так как учитывают не только концентрацию веществ в отбираемых пробах, но и количество осадков. Средневзвешенные концентрации были вычислены по формуле (1):

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot q_i}{\sum_{i=1}^n q_i}, \quad (1)$$

где \bar{C} – средневзвешенная концентрация вещества в атмосферных осадках, мг/л; C_i – концентрация вещества в пробе, мг/л; q_i – количество осадков за месяц, мм; n – число месяцев с осадками.

Ошибка средней величины концентрации компонента в химическом составе атмосферных осадков вычислялась по формуле (2):

$$\Delta_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}, \quad (2)$$

где Δ_x – ошибка средней величины, σ – среднее квадратическое отклонение, n – объем выборки.

Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья

Обобщенные характеристики ионного состава осадков (удельная электропроводность k и величина pH), а также средневзвешенные годовые концентрации ионов по месячным данным 2015 г. сведены в табл. 1.

В химическом составе атмосферных осадков преобладают сульфат-ионы. Их содержание составляет 26, 42 и 35 % соответственно в Атлантическом, Сибирском и Тихоокеанском секторе. «Второе» место «поделили» между собой хлорид- и гидрокарбонат-ионы. В атлантическом секторе их относительно суммарное содержание составляет 35 % и превышает содержание сульфат-ионов. На хлорид- и гидрокарбонат-ионы в Сибирском

Таблица 1. Средневзвешенные концентрации основных ионов в 2015 г.

Table 1. Weighted average concentrations of major ions in 2015

Сектор Sector	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	M	pH	k, мкСм/см
	мг/л/mg/L											
Атлантический/Atlantic	2,8	1,8	0,9	2,1	0,2	0,9	0,6	1,2	0,3	10,8	5,8	25,2
Сибирский/Siberian	13,4	2,6	0,7	7,1	0,6	1,7	1,0	2,0	2,5	31,6	6,1	70,7
Тихоокеанский/Pacific	3,6	0,7	0,8	2,7	0,4	0,5	0,4	0,9	0,3	10,3	5,8	24,6

секторе приходится 31 % от общей суммы макрокомпонентов, причем доля гидрокарбонат-ионов составляет 22 %. Для атмосферных осадков Тихоокеанского сектора характерно относительно одинаковое содержание хлорид- и нитрат-ионов (7 и 8 % соответственно). Доля гидрокарбонат-ионов составляет 26 %. Такое распределение основных анионов может свидетельствовать о большей континентальности станций, расположенных в Сибирском и Тихоокеанском секторах.

Средневзвешенные концентрации нитратов примерно одинаковые для всей территории Российского Заполярья, и в среднем составляют 0,7 мг/л. Концентрации ионов аммония по сравнению с Атлантическим сектором выше в 3 и 2 раза соответственно в Сибирском и Тихоокеанском секторах. Из катионов преобладают кальций и натрий с заметно более высоким содержанием магния в Сибирском секторе.

На рис. 1 представлен временной ход концентраций ионов в атмосферных осадках Заполярья.

Характер колебаний временного хода основных анионов указывает на сравнительно небольшие различия их качественного и количественного состава в Атлантическом и Тихоокеанском секторах. Сибирский сектор выделяется не только повышенным содержанием сульфатов, гидрокарбонатов и хлоридов, но и заметной временной изменчивостью, а также некоторой тенденцией к снижению общей минерализации осадков. Высокие концентрации ионов в 2010–2011 гг., а также их значительные колебания связаны, возможно, с последствиями лесных пожаров.

Колебания кислотности атмосферных осадков Российского Заполярья

Кислотность атмосферных осадков относится к одному из самых неустойчивых параметров [7]. На кислотность осадков оказывают влияние, прежде всего, диоксиды углерода, серы и азота, их соли, а также аммонийные соединения. Окончательное равновесие в выпавших осадках устанавливается

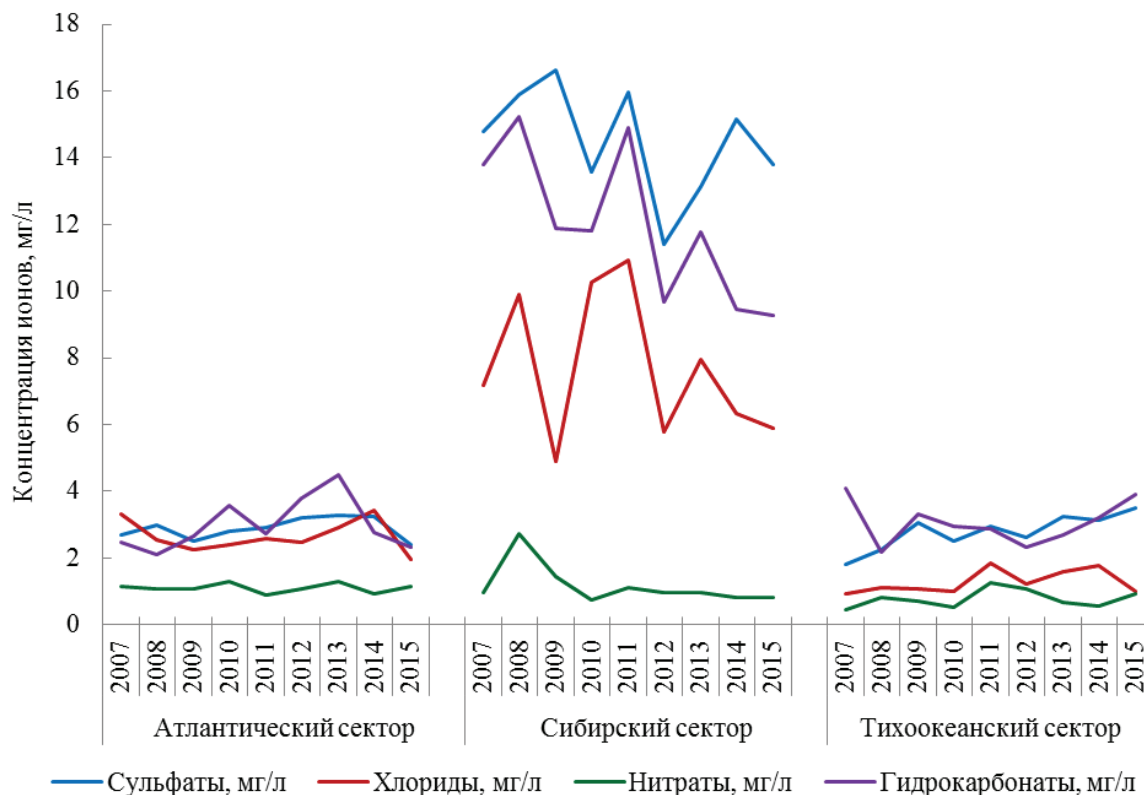


Рис. 1. Ход изменения со временем концентрации основных ионов в атмосферных осадках по секторам Заполярья, 2007–2015 гг.

Fig. 1. Annual variations of major ions concentrations and pH across the different sectors of the Russian arctic, 2007–2015

Таблица 2. Повторяемость значений величины рН в атмосферных осадках, 2007–2015 гг.

Table 2. Frequency distribution of precipitation pH, 2007–2015

Сектор/Sector	pH<4,5	4,5≤pH<5,0	5,0≤pH<5,5	5,5≤pH<6,0	pH≤6,0
Атлантический/Atlantic	9,5	10,2	12,6	20,9	46,8
Сибирский/Siberian	0,1	0,9	5,0	23,3	70,7
Тихоокеанский/Pacific	2,4	5,6	7,3	29,0	55,7

примерно через 10–15 суток, учитывая переход сульфитов и нитритов соответственно в сульфаты и нитраты [8]. Типичным природным кислотообразующим веществом является диоксид углерода. При среднем содержании диоксида углерода в атмосфере, равном 330 млн⁻¹, концентрация ионов водорода в равновесном водном растворе при 20 °С составит $2,5 \cdot 10^{-6}$ моль/л, а рН соответственно будет равен 5,6. Принято считать, что именно такое равновесное значение рН должны иметь незагрязненные атмосферные осадки в отсутствие других примесей [9]. В разных районах земного шара величина кислотности атмосферных осадков (рН), изменяется в широких пределах – от менее 4,0 до более 7,0 [10].

Повторяемость значений (%) величины рН в атмосферных осадках представлена в табл. 2.

Повторяемость выпадений кислых осадков (рН<5,0) составила 20, 1 и 8 % соответственно в Атлантическом, Сибирском и Тихоокеанском секторах. Вероятность выпадения осадков с высокой кислотностью (рН<4,5) весьма мала для Сибирского региона, в то время как в Атлантическом и Тихоокеанском регионах вероятность выпадения таких осадков составила соответственно 9,5 и 2,4 %. Осадки со значением рН≤6,0 наиболее характерны для Сибирского региона. Временной ход среднегодовой величины кислотности осадков представлен на рис. 2.

Временной ход величины рН осадков чрезвычайно изменчив на заполярных станциях. Наиболее кислые осадки постоянно выпадают на крайнем Северо-Западе РФ [11]. Но в то же время для Атлантического сектора характерна тенденция к уменьшению среднегодовой величины кислотности осадков.

Состав осадков в Центральной Арктике

Северный Ледовитый океан, в отличие от других океанов, не поставляет влагу в атмосферу и ежегодно из мирового влагооборота забирает более 2000 кубометров воды. Циклоны и антициклоны образуются редко в этой зоне; они приходят со стороны. Так называемые арктические фронты на азиатской территории РФ, проходя вдоль побережья летом, опускаются зимой до широты Палатки (60,1° с.ш., 150,9° в.д.). Постоянно высокое давление сохраняется круглый год только над плато Гренландии. Практически Арктика не имеет собственных техногенных источников загрязнения воздуха. Особенности распределения и загрязнения осадков в Арктике зависят (как и повсеместно) от трех основных факторов: характера атмосферной циркуляции, прихода и расхода тепла, а также многообразных воздействий подстилающей поверхности. Полярные день и ночь, большие площади дрейфующих льдов и полыньи создают специфические условия режима увлажнения воздуха и

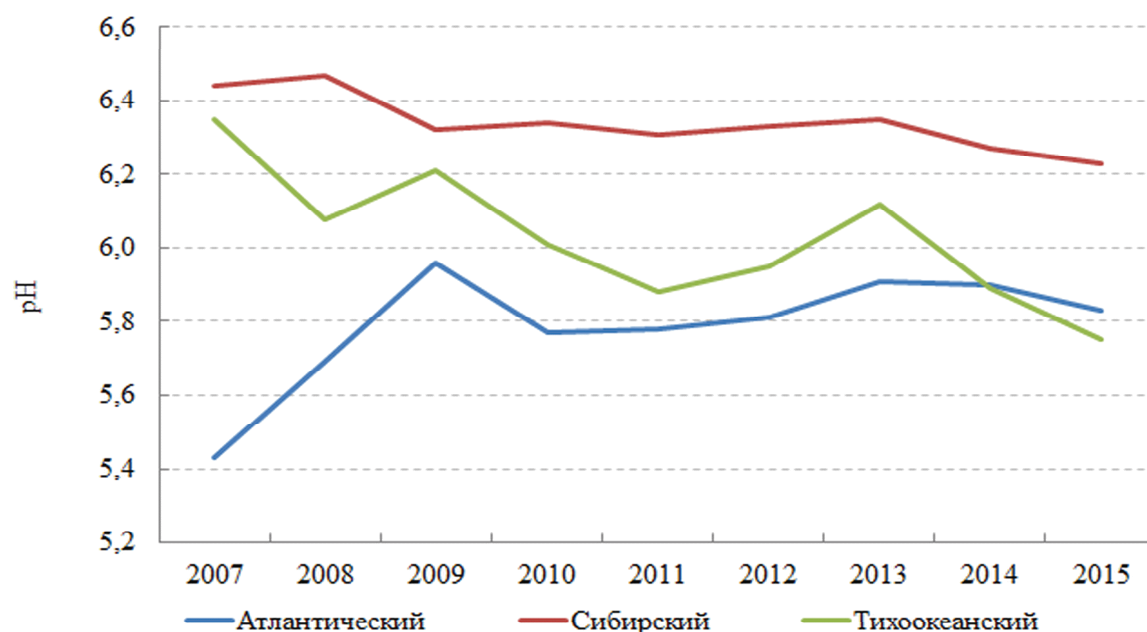


Рис. 2. Временной ход среднегодовой величины рН, 2007–2015 гг.

Fig. 2. Average annual precipitation pH since 2007 to 2015

формирования химического состава осадков. В холодный период года, когда циклоническая деятельность наиболее развита, повторяемость выпадения осадков очень велика, но сумма их оказывается меньше летних осадков. Такое положение объясняется заметным уменьшением влагосодержания воздушных масс в связи с понижением температуры воздуха и ввиду их удаления в сторону Арктики от исландского и алеутского циклонических центров действия атмосферы. В летнее время, наряду с уменьшением повторяемости осадков, возрастает их интенсивность. В Арктике чаще, чем где-либо, выпадают мелкие фронтальные осадки из слоистых и слоисто-кучевых облаков. Внутри-массовые осадки составляют небольшую долю от общей суммы [12–16].

Влияние человеческой деятельности заметно сказывается на природных условиях не только урбанизированных территорий, но даже ледяного плато Северного Ледовитого океана. Оказалось, природа Арктики особенно чувствительна к наличию загрязнений в воздухе [1, 4, 6].

Наблюдения за аэрозолями в Арктике позволили выявить наиболее вероятные источники загрязнения ее атмосферы: локальные, региональные и попавшие сюда в результате дальнего переноса [12, 17].

В течение осенне-зимнего периода 2007–2008 гг. на ледовой станции СП-35 были организованы отборы месячных и единичных проб атмосферных осадков. Средняя за год сумма осадков в районе дрейфа льдины со станцией СП-35 (и ЛБ-35) была примерно 200 мм (200 л/м²-год) с многолетними колебаниями от 100 до 280 мм. Местные загрязнения здесь проявляются в осадках через периодическое повышенное содержание хлоридов, основным источником которого считают обычно открытые водные поверхности и прибрежные зоны «мирового океана». При размахе значений концентрации хлоридов от 0,2 до 1,1 мг/л в отдельных единичных измерениях и большинстве месячных осадков при среднем содержании 14,8 мг/л отношение хлора к натрию остается близким к 1,8, что является характерным для морской воды. Вглубь континента доля хлора в осадках обычно падает и появляется хлорид натрия терригенного (почвенного) происхождения.

В осадках на Ледовой базе (табл. 3) преобладают гидрокарбонаты (0,5–1,64 мг/л), затем следуют нитраты (0,04–0,6 мг/л) и сульфаты (0,03–0,44 мг/л). Их присутствие связывают с наличием в воздухе соответственно почвенной пыли, диоксидов азота и серы.

Конечно, возможно попадание в осадки сульфата магния из морской воды и образование карбонатов при растворении углекислого газа из воздуха. По средним значениям главные компоненты распределяются: гидрокарбонаты (0,96 мг/л), затем хлориды (0,66 мг/л), нитраты (0,20 мг/л) и сульфаты (0,17 мг/л). Связаны они в основном с кальцием (0,46 мг/л) и натрием (0,32 мг/л).

Таблица 3. Показатели химического состава единичных атмосферных осадков на Ледовой базе, 2007 г.

Table 3. Chemical composition parameters in event precipitation on the Ice Base, 2007

Параметры Parameters	Дата выпадения осадков/Sample period						
	19.06.	07.07.	11.07.	11.07.	01.08.	12.08.	07.09.
Сульфаты, мкг/л Sulfate, µg/L	50	30	70	440	130	90	370
Хлориды, мкг/л Chloride, µg/L	210	570	1060	740	570	710	780
Нитраты, мкг/л Nitrate, µg/L	40	40	140	60	600	200	300
Гидрокарбонаты, мкг/л Hydro carbonate, µg/L	490	1040	994	670	1640	1400	490
Аммоний, мкг/л Ammonium, µg/L	20	20	20	10	40	30	80
Натрий, мкг/л Sodium, µg/L	80	300	60	300	390	700	410
Калий, мкг/л Potassium, µg/L	10	10	140	40	50	90	50
Кальций, мкг/л Calcium, µg/L	190	490	670	530	550	280	490
Магний, мкг/л Magnesium, µg/L	30	50	110	100	90	60	90
Сумма ионов, мг/л Sum of ions, mg/L	1,12	2,55	3,8	2,89	4,06	3,56	3,6
Величина pH	5,73	6,05	5,85	5,87	5,8	6,1	5,7
Проводимость, к, мкСм/см Conductivity, µSm/cm	3	5	9	7	8	7	8
Железо, мкг/л Ferrum, µg/L	14,7	26,8	40,9	29,1	28,3	69,0	20,7
Цинк, мкг/л Zinc, µg/L	13,4	6,8	57,7	11,1	13,4	16,1	13,2
Никель, мкг/л Nickel, µg/L	111,5	141,2	31,1	135,2	141	129,7	140,9
Медь, мкг/л Cuprum, µg/L	2,5	3,5	8,1	2,3	5,4	13,4	6,9
Свинец, мкг/л Lead, µg/L	0,31	0,5	1,3	0,7	1,4	0,8	0,2
Хром, мкг/л Chrome, µg/L	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Кадмий, мкг/л Cadmium, µg/L	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

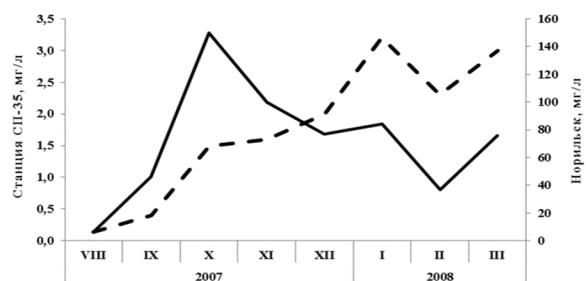


Рис. 3. Ход изменения концентрации сульфатов в атмосферных осадках на СП-35 (---) и в Норильске (—)

Fig. 3. Seasonal variation of sulfate concentration in precipitation of Ice Station (---) and Norilsk (—)

В подтверждение роли региональных источников в северо-восточном секторе Арктики сбор и хи-

мический анализ осадков проводили параллельно на дрейфующей льдине СП-35 и в Норильске (рис. 3). Характерно, что в августе абсолютной минимальной концентрации сульфатов на льдине соответствуют низкие значения в Норильске. Содержание сульфатов в Норильске выше, чем на СП-35, примерно в 40 раз.

Низкие значения концентраций сульфатов в атмосферных осадках на ледовой станции СП-35 отмечаются в летний период года. Максимальные значения концентраций сульфатов в осадках СП-35 характерны преимущественно для холодного периода и составляют свыше 1,5 мг/л. Причиной повышенного содержания сульфатов в осадках по сравнению с летним периодом может быть зимний перенос. Зимний перенос в Норильске происходит с более холодной суши на море в северо-западном и западном направлениях [18]. Это, по всей видимости, и приводит к региональному загрязнению западных секторов Арктики. Судя по максимальной кислотности и химическому составу осадков, вряд ли влияние Норильска распространяется до Салехарда или Нарьян-Мара. Направление муссона в то или иное полугодие не сохраняется здесь непрерывно, и нередко муссонное течение сменяется ветрами других направлений. В июне минерализация их и содержание основных компонентов (хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, кальция и натрия) сравнимы с фоновыми, а концентрация никеля оказывается сверхвысокой – в среднем до 111,5 мкг/л. Более 45 % таких осадков поступает с северо-востока и севера, то есть от Североамериканского континента. Карта, приведенная в сообщении АМАР [1], также показывает, что РФ далеко не основной поставщик воздушного загрязнения Центральной Арктики.

Высокий уровень химического загрязнения воздуха в Арктике, по-видимому, стал причиной формирования так называемой арктической дымки, которая, следуя за распределением задерживающих слоёв, практически постоянно присутствует в атмосфере полярных широт (табл. 4). При этом загрязняющее вещество, опускаясь в одних местах, поднимается в других до тех пор, пока его начальная плавучесть и инерция вертикального движения не исчерпаются. Далее происходит только дрейф по потоку, часто в виде тонкой, почти невозмущенной ленты. Высота инверсий зимой находится в пределах 500–1000 м, и они словно прижаты к поверхности льда. Летом система циркуляции воздуха перестраивается, и высота инверсионного слоя увеличивается до 2000 м. Зимой практически над всей северной частью азиатской территории России и над окраинными морями повторяемость инверсий при среднем значении 70 достигает 87 %, в западной части Арктики уменьшаясь до 40–50 % [19].

Явление дымки было хорошо известно первым исследователям Арктики и её отмечают во многих местах [20, 21]. Открытие же стабильности, многослойности и качественного различия слоёв дымки

положило конец более ранним представлениям о том, что аэрозольное загрязнение может быть только локальным и региональным. В холодном и сухом воздухе полярных регионов некоторые частицы способны многие сутки оставаться во взвешенном состоянии, что позволяет различным соединениям мигрировать на большие расстояния.

Таблица 4. Повторяемость инверсий и химический состав атмосферных осадков в Центральной Арктике

Table 4. Frequency distribution of inversions and chemical composition of precipitation in the Central Arctic

Характеристика Characteristic	Месяцы/Months						
	I	II	III	VII	X	XII	VI–VIII
Повторяемость инверсий, % Inversion frequency, %	77	78	87	28	38	67	30
Никель, мкг/л Nickel, µg/L	37	245	72	102	64	110	116
Железо, мг/л Ferrum, mg/L	72	195	198	32	75	134	32
Проводимость k, мкСм/см Conductivity, µSm/cm	166	46	32	7	46	112	5,8
Кислотность, мкг/л Acidity, µg/L	3,8	5,2	4,7	1,2	0,5	11,2	1,4
Сульфаты, мг/л Sulfate, mg/L	3,2	2,3	2,0	0,2	1,0	2	0,1

При существующей системе циркуляции воздуха перенос загрязнителей из промышленно развитых регионов Европы, Азии и Северной Америки в Арктику в основном осуществляется в зимний, а вынос на континенты – в летний периоды [22]. Накопленные в инверсионных слоях вещества затем частично выпадают с атмосферными осадками (табл. 4).

Невероятно, но концентрации свинца и кадмия, относящиеся к супертоксикантам, оказались вполне сопоставимыми с теми, которые были получены для заповедников Центрального федерального округа России [23], где, однако, они составляют ничтожную долю от общей суммы ионов. Суммарная же доля тяжёлых металлов в Арктике достигает 12 %. В холодный период содержание железа, марганца и меди превышает экологическую норму в 2–8 раз, цинка – в 17, а никеля – более чем в 20 раз. Летом эти величины несколько меньше. В большинстве городских осадков содержание никеля, марганца, меди, свинца, хрома и кадмия обычно на два или три порядка ниже содержания основных компонентов [24]. К числу наиболее опасных для экосистем относятся никель и медь, содержание которых значительно превышает экологическую норму, а также свинец и кадмий ввиду низкого допустимого уровня [25].

По результатам измерений линейная связь содержания большинства тяжёлых металлов и основных компонентов отсутствует. Причина может крыться как в качественном различии источников загрязнения, так и в особенностях дальнейшего поведения главных компонентов и микроэлементов. Существенно различаются их физико-химиче-

ские характеристики. Все сульфаты, хлориды, нитраты, аммонийные соли и соли щелочных металлов гигроскопичны и хорошо растворимы в воде, в результате чего при постоянно высокой в Заполярье относительной влажности воздуха (>75 %) они легко выпадают ещё на подступах к центральной Арктике и при отсутствии осадков. Наиболее интенсивно этот процесс идет в летнее время, на что указывает низкая проводимость осадков. Доля микроэлементов увеличивается и на фоне низкой минерализации, когда связанное с этим изменение удельной электропроводности осадков становится заметным. В зимних осадках концентрация тяжелых металлов, не уступая летним, практически не оказывает влияния на их проводимость.

Микроэлементы присутствуют в атмосфере, по-видимому, в виде смеси сажи с мелкодисперсными аэрозолями оксидов металлов и, возможно, металлоорганических соединений. Все промышленные производства и, в меньшей степени, транспорт выбрасывают в атмосферу, помимо широко известных газов сажу, летучую золу, мелкодисперсную пыль, эфирные масла и жирные кислоты. Минеральная составляющая буквально пропитывается органическими веществами (сажа всегда кажется маслянистой). Эти вещества слабо растворимы в воде и плохо смачиваются. Инверсионные слои, накапливая их и задерживая вертикальный обмен, способствуют сохранению арктической дымки круглый год.

Непосредственно в облачных элементах концентрация тяжелых металлов, по-видимому, невелика, но влажные выпадения создают поток воздуха с аэрозолями, которые вместе с элементами осадков попадают в осадкосборники. Таким образом, процесс выведения загрязнений из воздуха на местном уровне складывается из условно сухих, сухо-влажностных и влажных выпадений (собственно осадки). На содержании тяжелых металлов, возможно, сказываются температурные и влажностные характеристики воздуха, продолжительность осадков. Кажется, только поведение железа

и цинка сопоставимо с распределением основных компонентов. Заметим, что в настоящее время на некоторых региональных станциях России цинк и железо наряду с магнием можно причислить к основным компонентам.

Сопоставление данных по химическому составу осадков в 2007 и 2008 гг. в Центральной Арктике и по континентальному Заполярье представлено в табл. 5. Для каждого сектора были выбраны станции в сельской местности и рассчитаны средние значения концентрации компонентов. В качестве фоновых станций взяты: Падун (Атлантический сектор), Туруханск (Сибирский) и Палатка (Дальневосточный).

По совместным данным СП-35 и ЛБ-35, в Центральной Арктике в осадках значительно преобладают хлориды местного происхождения, попадая туда, по-видимому, с метелью и в результате выноса хлорида натрия с разводий.

Максимальное содержание сульфатов и гидрокарбонатов приходится на Норильск, указывая на присутствие в воздухе большого количества диоксида серы и пыли в виде карбонатов. Распространяясь на юг и на север, концентрация сульфатов уменьшается в Туруханске до уровня 2,5 мг/л, превышающего фоновый примерно на 20 %, а на острове Диксон, расположенном севернее Норильска, примерно до 10 мг/л. На ледяном плато содержание сульфатов в среднем за год ниже регионального фонового уровня континентальной Арктики почти в 2 раза. Примерно также ведут себя гидрокарбонаты и кальций, характеризуя запыленность воздуха.

Выводы

Причины повышенного содержания тяжелых металлов в пробах атмосферных осадков остаются практически неясными. Очевидна настоятельная необходимость не только продолжить, но и организовать по специальной программе регулярные наблюдения за кислотностью и химическим составом атмосферных осадков на акватории Северного Ледовитого океана. При этом следует расширить пе-

Таблица 5. Количество осадков и химический состав атмосферных осадков в Заполярье по средним за год значениям, 2007 и 2008 гг.

Table 5. Annual mean concentrations of precipitation in the Russian Arctic, 2007–2008

Компонент Components	Заполярье/Subarctic							СП-35 Polar station	ЛБ-35 Ice station
	Атлантический/Atlantic		Сибирский/Siberian			Тихоокеанский/Pacific			
	сектор sector	Падун Padun	сектор sector	Норильск Norilsk	Туруханск Turukhansk	сектор sector	Палатка Palatka		
q, мм	618	530	485	470	640	310,2	462	200	200
SO ₄ ²⁻ , мг/л (mg/L)	2,7±0,4	2,0±0,1	12,1±0,8	90±9	2,2±0,2	1,5±0,2	2,1±0,3	1,2±0,3	0,2±0,1
Cl ⁻ , мг/л (mg/L)	3,4±0,8	1,1±0,2	10,8±3,1	5,1±0,5	0,8±0,1	0,8±0,3	0,7±0,2	14,8±0,2	0,7±0,1
HCO ₃ ⁻ , мг/л (mg/L)	2,4±0,8	0,1±0,1	8,4±2,3	23,4±0,2	3,6±0,2	3,3±1,0	2,7±0,6	0,9±0,1	1,0±0,2
Na ⁺ , мг/л (mg/L)	1,7±0,5	0,4±0,1	4,8±1,9	1,0±0,08	0,8±0,1	0,6±0,3	0,4±0,1	5,3±0,4	0,3±0,1
Ca ²⁺ , мг/л (mg/L)	1,2±0,2	0,4±0,02	2,2±0,7	7,6±0,6	0,5±0,04	0,7±0,1	1,1±0,1	1,6±0,1	0,5±0,1
M, мг/л (mg/L)	11,4±2,0	4,0±0,8	38,3±4,0	127±13	7,9±0,1	6,9±0,8	7,0±0,5	23,8±2,4	3,1±0,3
k, мкСм/см (µSm/cm)	28±4	15±4	103±10	301±30	19±0,3	19±4	13±2	55±6	6,7±0,8
pHcp/average pH	5,5±0,2	4,7±0,4	6,3±0,1	7,3±0,4	6,2±0,1	6,1±0,1	5,7±0,2	5,6±0,2	5,9±0,1

речень компонентов, анализируемых в атмосферных осадках, включив в него тяжелые металлы, такие как железо, кадмий, медь, никель, свинец, цинк, хром и ртуть.

В заключении кратко сформулируем основные положения изложенного материала.

- Качественный и количественный состав атмосферных осадков Атлантического и Тихоокеанского секторов слабо отличается.
- Наблюдается некоторая тенденция к снижению общей минерализации осадков в Сибирском секторе.

- Месячные значения рН осадков выше в Сибирском секторе, а абсолютная максимальная кислотность осадков характерна для атмосферных осадков Атлантического сектора.
- Сумма тяжелых металлов при самой низкой общей минерализации достигает 12 %.
- Полученные значения концентраций тяжелых металлов (кадмия и свинца) на СП-35 как в единичных, так и в месячных пробах атмосферных осадков не превышали среднегодовые фоновые концентрации в атмосферных осадках на территории РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АМАР, 1998. АМАР Assessment Report: Arctic pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, Norway, 1998. – xii+859 p.
2. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: ИЦ «Академия», 2003. – 400 с.
3. Петренчук О.П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 264 с.
4. АМАР, 2005. АМАР Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. – Oslo, Norway, 2005. – xii+265 p.
5. Методическое письмо. Состояние работ по наблюдению за химическим составом и кислотностью атмосферных осадков в 2015 году. – СПб, 2016. – 56 с.
6. АМАР, 2006. АМАР Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. Arctic monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, Norway, 2006. – xii+112 p.
7. Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186–89. – М., 1991. – 696 с.
8. Свистов П.Ф., Талаш А.С., Семенец Е.С. О пространственно-временных изменениях кислотности атмосферных осадков // Климат и Природа. – 2016. – № 2 (19). – С. 14–26.
9. Кислотные дожди / Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Пресман и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 269 с.
10. GAW Report No. 160. Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme. – WMO, 2004. – xii+170 p.
11. Першина Н.А., Полищук А.И., Свистов П.Ф. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике // Труды ГГО. – 2008. – Вып. 558. – С. 211–232.
12. Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации / под ред. Б.А. Моргунова. – М.: Научный мир, 2011. – 124 с.
13. Ye H., Kalkstein L.S. The detection of climate change in the Arctic: an updated report // Atmospheric research. – 1995. – V. 37. – Iss. 1–3. – P. 163–173.
14. Прик З.М. Физико-географическое районирование Арктики. Ч. 1. – Л.: Гидрометиздат, 1967. – С. 15–48.
15. Физико-географическая характеристика Арктической зоны России. Обзор Росгидромета, 2011. – Гл. 1. – С. 14–46.
16. Overland J.E. A difficult Arctic Science issue: Midlatitude weather linkages // Polar Science. – 2016. – V. 10. – Iss. 3. – P. 210–216.
17. АМАР, 2015. АМАР Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, Norway. – vii+116 p.
18. Архив погоды в Норильске // World Weather.ru. URL: <http://world-weather.ru/archive/russia/norilsk> (дата обращения 25.08.2016).
19. Quantifying the clear-sky temperature inversion frequency and strength over the Arctic Ocean during summer and winter seasons from AIRS profiles / A. Devasthale, U. Will, K.-G. Karlsson, C. G. Jones // Atmos. Chem. Phys. Discuss. – 2010. – V. 10. – P. 2835–2858. URL: <http://www.atmos-chem-phys.net/10/5565/2010/acp-10-5565-2010.pdf> (дата обращения: 25.08.2016).
20. Aerosol remote sensing in polar regions / C. Tomasi, A.A. Kokhanovsky, et al. // Earth-Science Review. – 2015. – V. 140. – P. 108–157.
21. Barrie L.A. Occurrence and trends of pollution in the Arctic troposphere // NATO ASI Series. – 1996. – V. 143. – P. 93–129.
22. Котова Е.И., Шевченко В.П. Влияние дальнего атмосферного переноса на формирование ионного состава атмосферных осадков и снежного покрова прибрежной зоны западного сектора Российской Арктики // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–11. – С. 2378–2382. URL: <http://www.fundamental-research.ru/pdf/2014/12-11/36699.pdf> (дата обращения 10.10.2016).
23. Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К. Эколого-аналитический мониторинг супертоксикантов. – М.: Изд-во «Химия», 1996. – 320 с.
24. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды. Справочные материалы / под ред. Т.В. Гусевой. – М.: Изд-во «ФОРУМ-ИНФРА-М», 2007. – С. 93–111.
25. Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. – М.: Мир, 1987. – С. 175–195.

Поступила 12.02.2017 г.

Информация об авторах

Семенец Е.С., младший научный сотрудник Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

Свистов П.Ф., кандидат географических наук, старший научный сотрудник Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

Талаш А.С., заместитель начальника международного отдела Национального центра управления в кризисных ситуациях МЧС России.

UDC 551.510.04

CHEMICAL COMPOSITION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN RUSSIAN SUBARCTIC

Elena S. Semenets¹,
elena573s@yandex.ru

Petr F. Svistov¹,
svistov.pf@gmail.com

Aleksandr S. Talash²,
aleksandr.talash@gmail.com

¹ Voeikov Main Geophysical Observatory,
7, Karbysheva street, Saint-Petersburg, 194021, Russia.

² National Crisis Management Center,
1, Vatutina street, Moscow, 109012, Russia.

The relevance of studying chemical composition of atmospheric precipitation is caused by the need to control migration and transformation of pollutants that define the surface load.

The aim of the work is to summarize the measurement results of the major and minor ions of precipitation chemical composition in the Russian Polar region in 2007–2015, including the results obtained in the cooperative program of the Arctic and Antarctic Research Institute and the Voeikov Main geophysical observatory at the ice station in 2007–2008.

The research methods: theoretical analysis, data comparison.

The results. The authors have observed the increased content of heavy metals in precipitation in the Central Arctic. The heavy metal content reached up to 12 % of sum of ions. The maximum acidity was pH=4.7. The received values of heavy metals concentration (except nickel) in the atmospheric precipitation of the ice station didn't exceed background concentrations.

The summary. The reasons of the increased content of heavy metals in the atmospheric precipitation remain almost uncertain. It is necessary to organize according to the special program regular observations of acidity and chemical composition of atmospheric precipitation on the water area of the Arctic Ocean. At the same time it is necessary to expand the list of the analyzed components in atmospheric precipitation, included heavy metals in it.

Key words:

Natural conditions, precipitation, chemical composition, acidity, environment, wet fallout, regional background.

REFERENCES

1. AMAP, 1998. *AMAP Assessment Report: Arctic pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*. Oslo, Norway, 1998. xii+859 p.
2. Dobrovolskiy V.V. *Osnovy biogeokhimi* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow, Akademia Publ., 2003. 400 p.
3. Petrenchuk O.P. *Eksperimentalnye issledovaniya atmosfernogo aerolya* [Atmospheric aerosol experimental research]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 264 p.
4. AMAP, 2005. *AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic*. Oslo, Norway, 2005. xii+265 p.
5. *Metodicheskoe pismo. Sostoyanie rabot po nablyudeniya za khimicheskim sostavom i kislotnostyu atmosferykh osadkov v 2014 godu* [State management of chemical precipitations and atmospheric acidity in 2014]. St-Petersburg, 2015. 56 p.
6. AMAP, 2006. *AMAP Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. Arctic monitoring and Assessment Programme (AMAP)*. Oslo, Norway, 2006. xii+112 p.
7. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery RD 52.04.186–89* [Air pollution monitoring program]. Moscow, 1991. 696 p.
8. Svistov P.F., Talash A.S., Semenev E.S. O prostranstvenno-vremennyyh izmeneniyah kislotnosti atmosferykh osadkov. *Klimat i Priroda*, 2016, no. 2 (19), pp. 14–26.
9. Izrael Yu.A., Nazarov I.M., Pressman A.Ya. *Kislotnye dozhd* [Acid rain]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 269 p.
10. *GAW Report No. 160. Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme*. WMO, 2004. xii+170 p.
11. Pershina N.A., Polishchuk A.I., Svistov P.F. K voprosy o zakislennii atmosferykh osadkov v Rossiyskoy Arktike [Acidification of atmospheric precipitation in the Russian Arctic]. *Tr. GGO*, 2008, Iss. 558, pp. 211–232.
12. *Diagnosticheskiy analiz sostoyaniya okryzhayushchey sredy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii* [Diagnostic analysis of arctic environment state in the Russian Federation]. Ed. by B.A. Morgunov. Moscow, Naychny mir Publ., 2011. 124 p.
13. Ye H., Kalkstein L.S. The detection of climate change in the Arctic: an updated report. *Atmospheric research*, 1995, vol. 37, Iss. 1–3, pp. 163–173.
14. Prik Z.M. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie Arktiki* [Arctic physiographic zonation]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1967. P. 1, pp. 15–48.
15. *Fiziko-geograficheskaya kharakteristika Arkticheskoy zony Rossii* [Russian Arctic physiographic characteristics]. *Obzor Rosgidrometa*, 2011. Ch. 1, pp. 14–46.
16. Overland J.E. A difficult Arctic Science issue: Midlatitude weather linkages. *Polar Science*, 2016, vol. 10, Iss. 3, pp. 210–216.
17. AMAP, 2015. *AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*. Oslo, Norway. vii+116 p.
18. *Arkhiv pogody v Noril'ske* [Norilsk weather records]. *World Weather.ru*. Available at: <http://world-weather.ru/archive/russia/norilsk> (accessed 25 August 2016).
19. Devasthale A., Will U., Karlsson K.-G., Jones C.G. Quantifying the clear-sky temperature inversion frequency and strength over the Arctic Ocean during summer and winter seasons from AIRS profiles. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2010, vol. 10,

- pp. 2835–2858. URL: <http://www.atmos-chem-phys.net/10/5565/2010/acp-10-5565-2010.pdf> (accessed 25 August 2016).
20. Tomasi C., Kokhanovsky A.A. Aerosol remote sensing in polar regions. *Earth-Science Review*, 2015, vol. 140, pp. 108–157.
 21. Barrie L.A. Occurrence and trends of pollution in the Arctic troposphere. *NATO ASI Series*, 1996, vol. 143, pp. 93–129.
 22. Kotova E.I., Shevchenko V.P. Vliyaniye dalnego atmosfernogo pelenosa na formirovaniye ionnogo sostava atmosferykh osadkov i snezhnogo pokrova pribrezhnoy zony zapadnogo sektora Rossiyskoy Arktiki [Influence of long-range transport to precipitation chemistry formation and snow cover of a coastal zone of the western sector of the Russian Arctic]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2014, no. 12–11, pp. 2378–2382; Available at: <http://www.fundamental-research.ru/pdf/2014/12-11/36699.pdf> (accessed 10 October 2016).
 23. Maystrenko V.N., Khamitov R.Z., Budnikov G.K. *Ekologo-analitichesky monitoring supertoksikantov* [Environmental and analytical monitoring of supertoxicants]. Moscow, Khimiya Publ., 1996. 320 p.
 24. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy. Spravochnye materialy* [Geochemical indices of environment state]. Ed. by T.V. Guseva. Moscow, FORUM–INFRA-M Publ., 2007. pp. 93–111.
 25. Mur Dzh.V., Ramamurti S. *Tyazhelye metally v prirodnykh vodakh* [Heavy metals in natural waters]. Moscow, Mir Publ., 1987. pp. 175–195.

Received: 12 February 2017.

Information about the authors

Elena S. Semenets, junior researcher, Voeikov Main Geophysical Observatory.

Petr F. Svistov, Cand. Sc., senior researcher, Voeikov Main Geophysical Observatory.

Aleksandr S. Talash, deputy director, National Crisis Management centre subdivisions.