

# Кислотность атмосферных осадков и атмосферные выпадения серы и азота в Арктической зоне Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова

В. А. Ветров<sup>1</sup>, доктор физико-математических наук,

В. В. Кузовкин<sup>2</sup>, кандидат географических наук,

Д. А. Манзон<sup>3</sup>, кандидат географических наук

ФГБУ Институт глобального климата и экологии Федеральной службы

по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской академии наук

*Изложены результаты наблюдений по программе мониторинга химического состава снежного покрова в российской Арктике. Выполнены расчеты и построены карты-схемы средних для каждого пункта наблюдения значений показателя рН и интенсивности выпадений серы и азота в регионах со снежными осадками в 2005–2013 гг. Общая картина распределения показателя рН в снежном покрове указывает на отсутствие масштабных процессов закисления снежных осадков на территории российской Арктики. Анализ динамики изменения со временем интенсивности атмосферных потоков серы и азота также свидетельствует об относительной устойчивости этих показателей в регионах в период 2005–2013 гг. Средние значения определяемых показателей в большинстве регионов Арктической зоны (кроме Мурманской области и арктических районов Красноярского края) соответствуют глобальному фону атмосферных осадков.*

**Ключевые слова:** мониторинг химического состава снежного покрова, пункты наблюдений, рН, сера и азот, закисление атмосферных осадков.

## Введение

Снежный покров обладает рядом свойств, делающих его удобным индикатором загрязнения как самих атмосферных осадков, так и последующего загрязнения поверхностных вод и почв. В результате сухого и влажного осаждения концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в снежном покрове оказываются обычно на два-три порядка величины выше, чем в атмосферном воздухе. Поэтому мониторинг содержания этих веществ в снежном покрове может производиться достаточно простыми методами и с высокой надежностью. Проба, отобранная по всей толщине снежного покрова, дает представительные данные о загрязнении в период от образования устойчивого снежного покрова до момента отбора пробы. Таким образом, снежный покров как естественный планшет-накопитель дает величину сухих и влажных выпадений ЗВ в холодный сезон

и является эффективным индикатором процессов закисления атмосферных осадков [6; 3].

Возможность использования снежного покрова в качестве индикатора загрязнения атмосферных осадков послужила основой для организации мониторинга химического состава снежного покрова на территории СССР на базе существовавшей снегомерной сети, используемой для определения влагозапаса в снежном покрове. Мониторинг химического состава снежного покрова был предложен авторами работ [6; 3] и нашел развитие в их последующих разработках [1].

В настоящей работе рассматривается территория, идентифицируемая как Арктическая зона Российской Федерации, в которую полностью или частично входят территории и акватории девяти субъектов Российской Федерации (рис. 1) [2].

## Методология

Из 570 пунктов наблюдений (ПН) сети мониторинга химического состава снежного покрова [4] России 71 ПН находится в пределах Северного полярного круга. В работе рассматриваются данные,

<sup>1</sup> e-mail: vetrov.igce@mail.ru.

<sup>2</sup> e-mail: Vladimir.kuzovkin@bk.ru.

<sup>3</sup> e-mail: dmanzon@mail.ru.



Рис. 1. Арктическая зона Российской Федерации [2]

полученные в 2000—2013 гг. на 78 ПН, расположенных в Арктической зоне.

В пробах снежного покрова по методикам Росгидромета [5] определяются: кислотность (водородный показатель pH), концентрации основных ионов — сульфат-иона ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), нитрат-иона ( $\text{NO}_3^-$ ), хлорид-иона ( $\text{Cl}^-$ ), гидрокарбонат-иона ( $\text{HCO}_3^-$ ), катионов аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), натрия ( $\text{Na}^+$ ), калия ( $\text{K}^+$ ), кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ).

Работы на сети мониторинга химического состава снежного покрова выполнялись по программам двух видов [5].

Программа первого вида выполнялась почти в 50% ПН. По ней в лабораториях управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и межрегиональных лабораториях измеряются: кислотность (pH), электропроводность, концентрация основных анионов — сульфатов ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), нитратов ( $\text{NO}_3^-$ ), хлоридов ( $\text{Cl}^-$ ), гидрокарбонатов ( $\text{HCO}_3^-$ ), катионов аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), натрия ( $\text{Na}^+$ ), калия ( $\text{K}^+$ ), кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ), а также содержание микрокомпонентов: фосфат-ионов, цинка, свинца, кадмия, марганца и никеля.

Программа второго вида — анализ только основных ионов гидрохимического состава. Она выполнялась на всех ПН. По ней в лабораториях определяют: кислотность (pH), электропроводность и концентрации перечисленных выше анионов и катионов [5].

Интенсивность выпадений серы и азота со снежными осадками  $P_{ij}$  ( $\text{кг}/\text{км}^2\cdot\text{м}$ ) по данным анализа снежного покрова на  $j$ -м ПН рассчитывалась по формуле

$$P_{ij} = \frac{C_{ij} \Delta h_j}{\Delta t_j} 30, \quad (1)$$

где  $C_{ij}$  — концентрация серы/азота в снежном покрове в  $j$ -м ПН ( $\text{мг}/\text{л}$ );  $\Delta h_j$  — средний влагозапас в  $j$ -м ПН ( $\text{мм}$ );  $\Delta t_j$  — время залегания снежного покрова в  $j$ -м ПН (дней).

Концентрация серы определялась по содержанию в снежном покрове сульфатов ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), азота — по содержанию нитратов ( $\text{NO}_3^-$ ) и аммония ( $\text{NH}_4^+$ ).

### Результаты мониторинга

#### Кислотность снежного покрова

В табл. 1 приведены средние значения показателя pH по регионам за период наблюдений в 2000—2013 гг.

Общая картина распределения средних значений показателя кислотности снежного покрова pH в регионах АЗРФ в 2000—2013 гг. указывает на отсутствие масштабных процессов закисления снежных осадков и достоверных трендов изменения pH за последние 14 лет наблюдений. Большинство средних значений pH в снежном покрове в регионах в 2000—2013 гг. были в пределах фоновых значений pH в атмосферных осадках, т. е. 5—6.

Регрессионный анализ приведенных в табл. 1 средних значений pH показал отсутствие достоверных временных трендов pH в регионах.

#### Интенсивность выпадения серы со снежными осадками

В табл. 2 приведены средние значения интенсивности выпадений серы со снежными осадками PS

Таблица 1. Средние значения рН в снежном покрове в регионах Арктической зоны Российской Федерации

Регион	2000	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Мурманская область (24 ПН)	5,3	5,4	5,3	5,6	4,8	5,4	4,2	4,9	5,8	5,6	4,9	5,2	4,7
Республика Карелия (2 ПН)	5,8	5,7	—	—	5,1	5,3	5,2	5,2	5,7	—	5,4	—	5,8
Архангельская область (3 ПН)	—	5,7	5,9	6,7	6,7	5,9	6,3	6,3	—	6,3	5,9	5,9	6,3
Ненецкий АО (8 ПН)	—	6,1	5,5	5,9	5,9	5,6	6,4	6,4	—	6,2	6,0	6,1	5,9
Ямало-Ненецкий АО (7 ПН)	5,5	5,2	5,0	4,6	5,1	5,3	5,3	5,2	5,2	5,2	5,1	5,2	5,5
Красноярский край (11 ПН)	—	5,1	5,6	5,6	5,8	5,7	5,4	5,9	5,0	5,7	5,7	5,4	5,5
Республика Саха (Якутия) (18 ПН)	5,2	6,0	5,5	5,5	5,4	5,1	5,5	5,3	5,8	5,7	5,3	5,4	5,7
Чукотский АО (5 ПН)	5,5	5,0	5,1	5,7	5,3	5,5	5,8	5,3	5,7	5,5	5,9	5,8	6,0

в регионах Арктической зоны, рассчитанные по данным наблюдений в 2005—2013 гг.

По результатам расчетов в 2005—2013 гг. средняя интенсивность потоков серы  $P_s$  со снежными осадками в большинстве регионов Арктической зоны лежала в пределах 5—16 кг/(км<sup>2</sup>·мес), в то время как для двух промышленных регионов (Мурманской области, севера Красноярского края) средние значения  $P_s$  составляли соответственно 24 и 30 кг/(км<sup>2</sup>·мес). Наибольшие интенсивности потоков серы  $P_s$  наблюдались в некоторые годы в ПН, близких к крупным промышленным центрам: в Норильске и южнее (в Снежногорске, Игарке) — до 180 кг/(км<sup>2</sup>·мес), в Хатанге — до 102 кг/(км<sup>2</sup>·мес).

На рис. 2 показана карта-схема средней интенсивности выпадений серы  $P_s$  со снежными осадками в каждом ПН на территории Арктики в 2005—2013 гг. Эти данные показывают, что в 2005—2013 гг. большая часть территории Арктики была подвержена воздействию фоновых и близких к фоновым потоков серы со снежными осадками — в диапазоне от менее 10 до 20 кг/(км<sup>2</sup>·мес) [4].

На карте-схеме средних значений  $P_s$  на сети ПН в Мурманской области (рис. 3) видны районы, испытывающие воздействие больших атмосферных потоков серы: при средней величине  $P_s$  в регионе в 2005—2013 гг. 24 кг/(км<sup>2</sup>·мес) (см. табл. 2) в некоторые годы она составляла 107 (Мурманск), 69 (Ковдор) и 49 (Никель) кг/(км<sup>2</sup>·мес).

Таблица 2. Средние значения  $P_s$  в регионах Арктической зоны по данным наблюдений в 2005—2013 гг.

Регион	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Среднее за период
Мурманская область (24 ПН)	41	28	18	7	26	35	27	18	20	24
Республика Карелия (2 ПН)	—	11	8	17	—	—	15	—	15	13
Архангельская область (3 ПН)	26	—	15	14	—	14	11	22	11	16
Ненецкий АО (8 ПН)	10	—	7	9	—	19	19	14	9	12
Ямало-Ненецкий АО (7 ПН)	12	10	9	13	12	9	8	8	10	10
Север Красноярского края (11 ПН)	57	34	21	45	27	9	24	—	20	30
Республика Саха (Якутия) (18 ПН)	7	5	6	11	6	6	7	6	6	7
Чукотский АО (5 ПН)	9	11	12	9	9	1	7	6	6	9

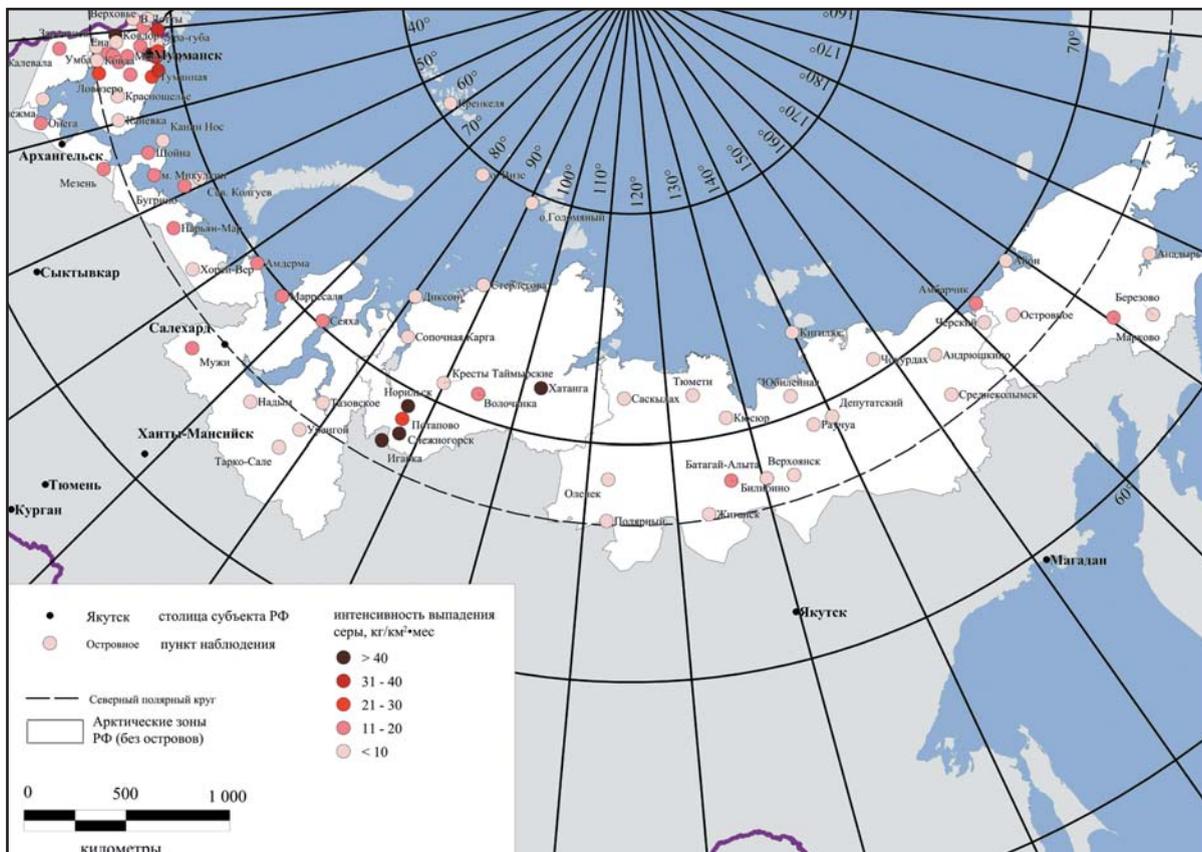


Рис. 2. Средние значения  $P_S$  в ПН на территории Арктической зоны Российской Федерации по данным наблюдений в 2005–2013 гг.

Регрессионный анализ приведенных в табл. 2 рядов средних значений  $P_S$  в регионах АЗРФ показал отсутствие каких-либо трендов изменений  $P_S$  в период 2005–2013 гг. По результатам анализа отмечается незначительная тенденция к снижению интенсивности выпадения серы на севере Красноярского края. Регрессионный анализ показал также отсутствие корреляции между средними по каждому региону потоками серы и показателем pH в снежном покрове.

#### Интенсивность выпадения азота со снежными осадками

В табл. 3 приведены средние значения интенсивности выпадений азота со снежными осадками  $P_N$  в регионах Арктической зоны, рассчитанные по данным наблюдений в 2005–2013 гг.

Интенсивность потоков азота  $P_N$  из атмосферы на территории Ненецкого АО, Республики Саха

(Якутия), Чукотского АО, севера Красноярского края лежала в пределах регионального фона — (1–10) кг/(км²·мес), в то время как средние значения  $P_N$  в Республике Карелия, Архангельской области, Ямало-Ненецком АО в некоторые годы достигали 32–68 кг/(км²·мес). За исключением Республики Карелия и Архангельской области средние

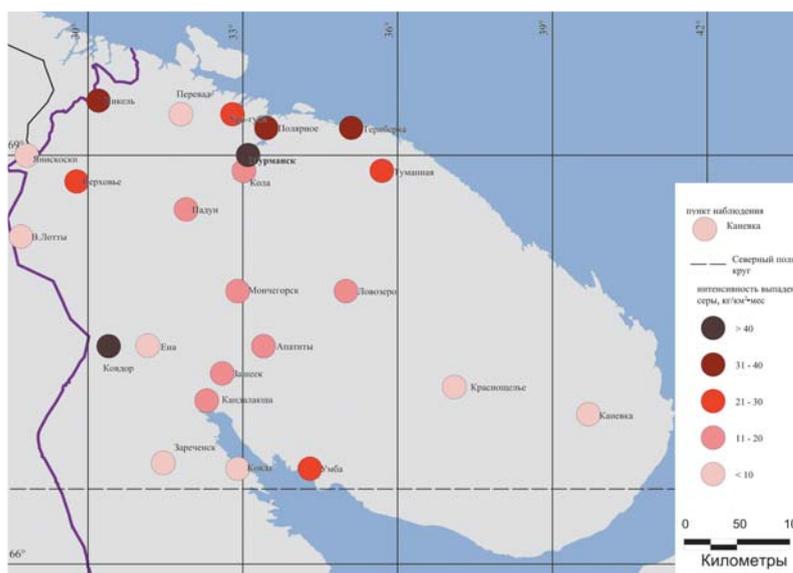


Рис. 3. Средние значения  $P_S$  в ПН на территории Мурманской области по данным наблюдений в 2005–2013 гг.

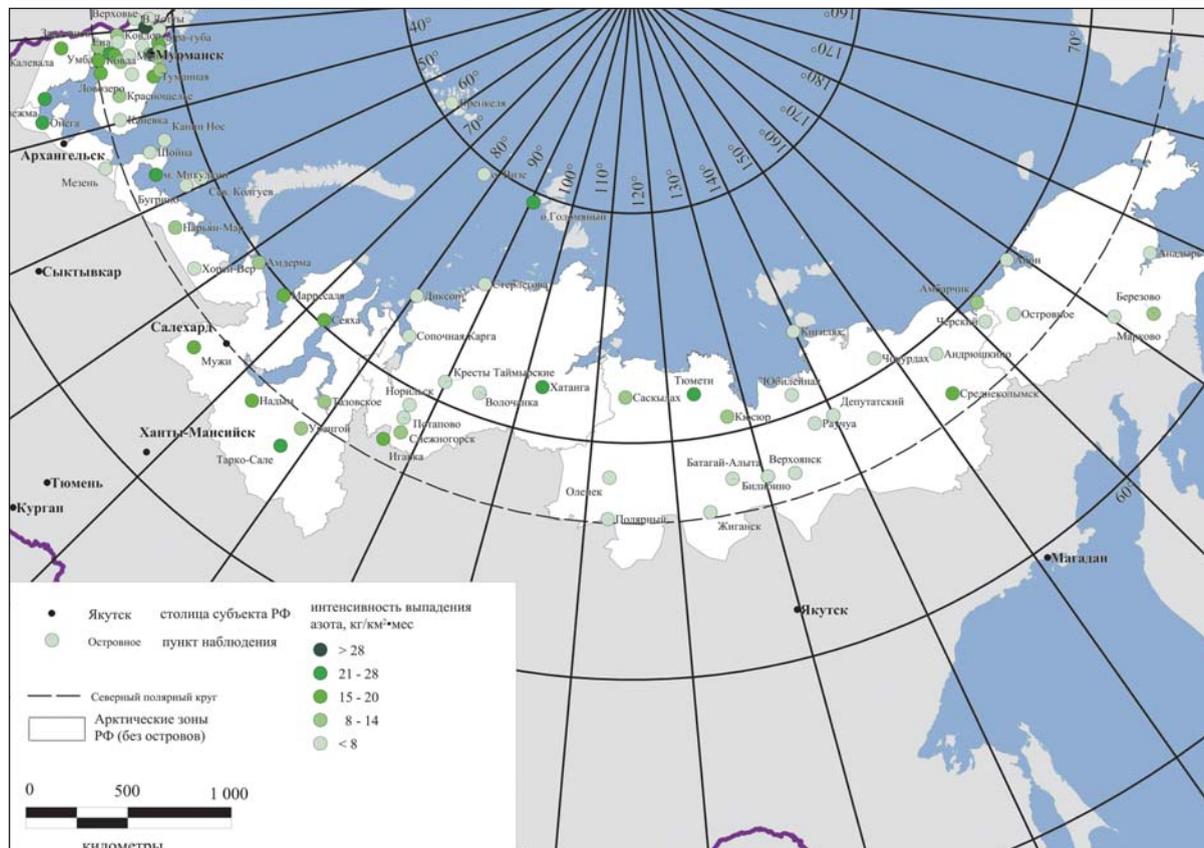


Рис. 4. Карта-схема средних значений  $P_N$ , рассчитанных по данным наблюдений на сети ПН мониторинга химического состава снежного покрова в 2005–2013 гг.

значения  $P_N$  в регионах за период 2005—2013 гг. лежат в пределах регионального фона — 6—15 кг/(км²·мес) [4].

Регрессионный анализ приведенных в табл. 3 рядов показывает отсутствие изменений в интенсивности выпадения азота на ПН в период 2005—2013 гг. для всех регионов.

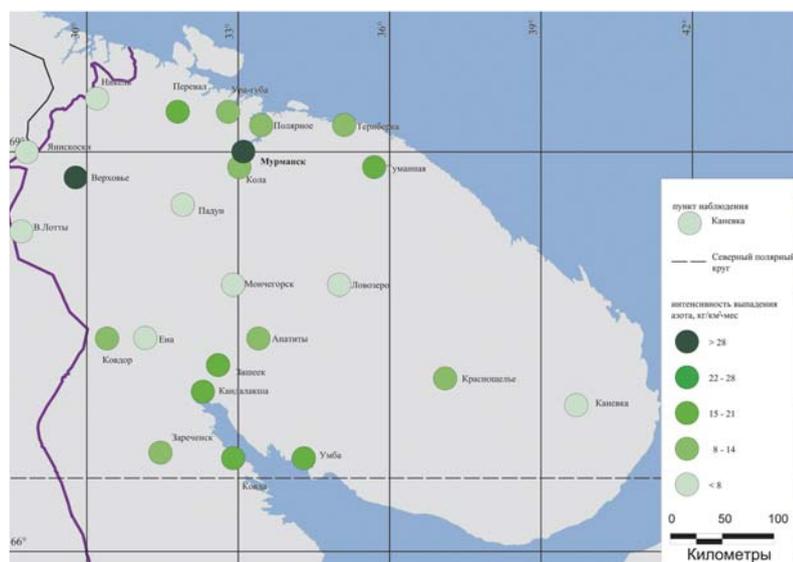


Рис. 5. Карта-схема средних значений  $P_N$  в Мурманской области

На рис. 4 показана карта-схема средних значений  $P_N$ , рассчитанных по данным наблюдений на сети ПН мониторинга химического состава снежного покрова на территории российской Арктики в 2005—2013 гг. В большинстве регионов интенсивность выпадений азота лежит в пределах от менее 8 до 20 кг/(км²·мес). Наибольшие значения  $P_N$  — более 20 кг/(км²·мес) — наблюдались в Мурманской области (рис. 5), Архангельской области, Республике Карелия и Ямало-Ненецком АО. При этом, как для серы, не отмечается корреляции между средними по региону выпадениями азота  $P_N$  и показателем pH в снежном покрове.

Регрессионный анализ приведенных в табл. 3 рядов средних значений  $P_N$  в регионах Арктической зоны показал также отсутствие достоверных трендов изменений  $P_N$  в 2005—2013 гг. для всех регионов Арктической зоны.

Таблица 3. Средние значения  $P_N$  в регионах Арктической зоны по данным наблюдений в 2005—2013 гг.

Регион	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Среднее за период
Мурманская область (24 ПН)	16	10	9	10	7	11	10	13	13	11
Республика Карелия (2 ПН)	—	32	13	15	—	—	18	—	22	20
Архангельская область (3 ПН)	—	—	9	12	—	68	2	3	6	17
Ненецкий АО (8 ПН)	10	—	4	4	—	5	4	9	4	6
Ямало-Ненецкий АО (7 ПН)	22	6	12	17	13	10	11	11	38	15
Красноярский край (11 ПН)	8	3	8	23	2	1	2	—	5	7
Республика Саха (Якутия) (18 ПН)	3	18	4	4	3	3	8	6	5	6
Чукотский АО (5 ПН)	—	6	6	6	6	10	5	5	3	6

### Заклучение

Общая картина распределения средних значений показателя кислотности снежного покрова рН в регионах Арктической зоны Российской Федерации в 2000—2013 гг. указывает на отсутствие масштабных процессов закисления снежных осадков и достоверных трендов изменения рН за последние 14 лет наблюдений. Большинство средних значений рН в снежном покрове в регионах были в пределах фоновых значений рН в атмосферных осадках, т. е. 5—6.

По данным наблюдений в 2005—2013 гг. были получены средние значения интенсивности потоков серы  $P_S$  в регионах Арктической зоны. Наибольшая интенсивность  $P_S$  наблюдались в ПН, близких к крупным промышленным центрам (Мурманску, Ковдору, Никелю, Норильску, Снежногорску, Игарке) — от 50 до 180 кг/(км<sup>2</sup>·мес). По этой причине средние региональные значения  $P_S$  в Мурманской области и северных районах Красноярского края — соответственно 24 и 30 кг/(км<sup>2</sup>·мес) — были значительно выше фоновых значений, наблюдаемых на остальной территории Арктической зоны, — от 7 до 16 кг/(км<sup>2</sup>·мес).

Статистический регрессионный анализ показал отсутствие видимой корреляции между средними по региону потоками серы и показателем рН в снежном покрове, а также отсутствие достоверных временных трендов  $P_S$  в регионах.

По данным наблюдений химического состава снежного покрова в 2005—2013 гг. были рассчитаны средние значения интенсивности выпадений азота  $P_N$  со снежными осадками в регионах Арктической зоны. При этом что средние значения  $P_N$  в большинстве регионов лежат в пределах регионального фона — 6—15 кг/(км<sup>2</sup>·мес), отмечается большая неравномерность выпадений азота в Мурманской

и Архангельской областях, в Республике Карелия и Ямало-Ненецком АО, где средние за период наблюдений азота потоки со снежными осадками в некоторых ПН достигают 42 кг/(км<sup>2</sup>·мес). Не отмечается корреляции между средними по региону выпадениями азота  $P_N$  и показателем рН в снежном покрове, а также достоверных временных трендов  $P_N$  в регионах.

### Литература

1. Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. — Л.: Гидрометеоздат, 1985. — 180 с.
2. Карта Российской Арктики / Ю.Ф. Лукин, А. Э. Еремин. — Архангельск, 2011.
3. Назаров И. М., Ренне О. С., Фридман Ш. Д. и др. Снежный покров как индикатор загрязнения атмосферы // Труды Института физики и математики АН Литовской ССР. — 1976. — Вып. 3. — С. 7—12.
4. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2013 г. — М.: Росгидромет, 2014. — В печати.
5. Руководящий документ «Руководство по контролю загрязнения атмосферы» (РД 52.04.186-89) — Введен 1991-07-01.
6. Снеговые съемки на службе контроля загрязнения окружающей среды/Т. Н. Жигаловская, И. М. Назаров, Ш. Д. Фридман, О. С. Ренне. — М.: Гидрометеоздат, 1979. — 11 с.