

## ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 551.510.42 (517)

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(175-182)

Г.С. ЖАМСУЕВА\*, А.С. ЗАЯХАНОВ\*, А.В. СТАРИКОВ\*, Т.С. БАЛЬЖАНОВ\*,  
В.В. ЦЫДЫПОВ\*, А.Л. ДЕМЕНТЬЕВА\*, Т.В. ХОДЖЕР\*\*, Л.П. ГОЛОБОВА\*\*,  
О.И. ХУРИГАНОВА\*\*, Д. АЗЗАЯ\*\*\*, Д. ОЮНЧИМЭГ\*\*\*

\*Институт физического материаловедения СО РАН,  
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия, Lmza@mail.ru

\*\*Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия,  
khodzher@lin.irk.ru, lg@lin.irk.ru, khuriganowa@lin.irk.ru

\*\*\*Информационно-исследовательский институт метеорологии, гидрологии и окружающей среды  
Монголии, 210646, Улан-Батор, Жулчны гудамж, 5, Монголия,  
azzaya.do@gmail.com, dugerjavoyunchimeg@yahoo.com

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ГОРОДА УЛАН-БАТОРА В 2005–2014 ГОДАХ

*Представлены результаты исследований атмосферных аэрозолей в г. Улан-Баторе (Монголия), проведенных в 2005–2014 гг. Установлено, что крупнейшими источниками взвешенных частиц выступают сжигание топлива при работе двигателей автомобильного транспорта, предприятий теплоэнергетики, промышленных предприятий и перенос минеральной пыли, основные компоненты аэрозольных частиц —  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ . Определено, что зимой вследствие роста потребления топлива, штилевой погоды, орографических особенностей рельефа, способствующих накоплению вредных примесей в атмосфере города, средняя сумма ионов возрастает до  $43,9\text{--}114,6$   $\text{мкг}/\text{м}^3$  по сравнению с  $7,44\text{--}18,48$   $\text{мкг}/\text{м}^3$  в теплые месяцы. Отмечены межгодовые различия в составе аэрозоля: в декабре 2011 г. суммарное содержание ионов в нем составило в среднем  $43,9$   $\text{мкг}/\text{м}^3$ , в 2012 г. —  $114,6$ , в 2013 г. —  $68,7$ , в 2014 г. —  $64,7$   $\text{мкг}/\text{м}^3$ . Выявлено, что концентрация суммы ионов в аэрозоле зимнего периода более чем в шесть раз выше, чем летом. Наибольшее превышение концентраций отмечено для щелочных ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и щелочно-земельных ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  (более чем в 20 раз), входящих в состав зольных компонентов. Наблюдается различие химического состава аэрозоля, отобранного в центре города и на его окраине. Установлено, что состав и концентрация аэрозоля в Улан-Баторе в зимний период сопоставимы с составом аэрозолей промышленных городов Китая.*

Ключевые слова: водорастворимые компоненты, сезонные и межгодовые вариации, метеосостояния, загрязнение, перенос примесей.

G.S. ZHAMSUEVA\*, A.S. ZAYAKHANOV\*, A.V. STARIKOV\*, T.S. BALZHANOV\*,  
V.V. TSYDYPOV\*, A.L. DEMENTYIEVA\*, T.V. KHODZHER\*\*, L.P. GOLOBOKOVA\*\*,  
O.I. KHURIGANOVA\*\*, D. AZZAYAA\*\*\*, D. OYUNCHIMEG\*\*

\*Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
670047, Ulan-Ude, ul. Sukhyanovoi, 6, Russia, Lmza@mail.ru

\*\*Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, ul. Ulan-Batorskaya, 3,  
Irkutsk, Russia, khodzher@lin.irk.ru, lg@lin.irk.ru, khuriganowa@lin.irk.ru

\*\*\*Information and Research Institute of Meteorology, Hydrology and Environment of Mongolia,  
210646, Ulaanbaatar, Juulchny gudamj, 5, Mongolia,  
azzaya.do@gmail.com, dugerjavoyunchimeg@yahoo.com

© 2018 Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Стариков А.В., Бальжанов Т.С.,  
Цыдыпов В.В., Дементьева А.Л., Ходжер Т.В., Голобокова Л.П.,  
Хуриганова О.И., Аззая Д., Оюнчимэг Д.

## INVESTIGATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF ATMOSPHERIC AEROSOL IN ULAANBAATAR DURING 2005–2014

*Results from investigating atmospheric aerosols in Ulaanbaatar (Mongolia) 2005–2014 are presented. It is found that the largest sources of suspended particles are represented by fuel combustion and the concomitant exhaust gases, thermal power generation, industrial facilities and mineral dust transport; the main components of aerosol particles are  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , and  $\text{Na}^+$ . It is determined that in the wintertime, as a result of an increase in fuel consumption, calm weather and orographic characteristics of topography which contribute to accumulation of contaminants in the urban atmosphere, the average sum of ions increases to  $43.9\text{--}114.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  against  $7.44\text{--}18.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  during a warm season. Interannual differences in aerosol composition were noted; the total ion content averaged  $43.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  during December 2011,  $114.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  during December 2012,  $68.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  during December 2013, and  $64.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  during December 2014. It was found that the concentration of the sum of ions in the aerosol during the winter period is by a factor of 6 higher than during the summer. The highest exceedance of the concentrations was observed for the alkaline earth ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  (by a factor of more than 20) forming part of the ash components. There is a difference in the chemical composition of the aerosol sampled in the center of the city and on its outskirts. It is established that the aerosol composition and concentration in Ulaanbaatar during the winter period are comparable the aerosol composition in the industrial cities of China.*

*Keywords: water-soluble components, seasonal and interannual variations, weather conditions, pollution, transport of impurities.*

### ВВЕДЕНИЕ

Главной проблемой на территории Монголии становится загрязнение воздуха выбросами в атмосферу продуктов жизнедеятельности городов [1]. Наиболее крупный промышленный город Монголии Улан-Батор ( $47^\circ 55'$  с. ш.  $106^\circ 55'$  в. д.) расположен в центральной части страны. Население города составляет 1300 тыс. чел. по состоянию на 2013 г. (около 40 % от общего числа жителей Монголии). Рост численности обусловлен в основном притоком населения из сельских районов, из-за низкого уровня доходов люди селятся в юртах.

Эти участки становятся одними из основных источников загрязнения воздушной среды, особенно в зимнее время: каждая семья сжигает в среднем 5 т угля и  $3 \text{ м}^3$  древесины в год [2]. Кроме того, в городе имеются три угольных электростанции и около 400 тепловых котлов [3]. Потребление угля в 2007 г. в Улан-Баторе составило 4,9 млн т, в том числе в отопительных котлах около 400 тыс. т, на электростанциях — 3,4 млн т [4]. На долю электростанций приходится 66 % потребления угля, домов и юрт — 21 и 13 % соответственно [5]. В городе развито производство станков, стройматериалов (кирпичи, цемент), текстиля, продуктов питания. С 2005 по 2013 г. количество транспортных средств в Улан-Баторе увеличилось с 75 000 до 300 100 шт. Автомобили выбрасывают в год до 46 400 т токсичных веществ [6], будучи основным источником оксидов азота.

Город расположен на высоте 1350 м над ур. моря в межгорной котловине и окружен горами высотой до 2800 м. Климат резко континентальный, засушливый, средняя температура зимой составляет  $-19^\circ\text{C}$ , в год выпадает 270 мм осадков, преимущественно летом [7–9]. В зимнее время над Монголией господствует азиатский антициклон с маловетреной и малоснежной погодой. Часто наблюдающиеся в этот период температурные инверсии и горный рельеф препятствуют обмену воздуха и способствуют накоплению выбросов в атмосфере [2, 4, 10].

Загрязнение атмосферы — серьезная проблема для Улан-Батора, городская инфраструктура которого в последние годы плохо справляется с быстрым ростом населения, автопарка и энергопотребления, вследствие чего ухудшается качество окружающей среды, усиливается загрязнение воздуха. Так, например, в зимний период 2010–2011 гг. среднегодовая концентрация мелкодисперсной фракции аэрозолей  $\text{PM}_{2.5}$  составила  $136 \pm 114 \text{ мкг}/\text{м}^3$ , тогда как Всемирная организация здравоохранения рекомендует показатель  $\text{PM}_{2.5}$   $10 \text{ мкг}/\text{м}^3$  [11].

В данной работе представлены результаты исследования химических характеристик атмосферного аэрозоля в Улан-Баторе, изменения состава и содержания взвешенных частиц в зависимости от сезона, метеорологических условий, мест отбора проб.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерения характеристик атмосферных аэрозолей проводились в г. Улан-Баторе в летние и осенние месяцы 2005, 2006, 2013, 2014 гг. и в зимний период 2011–2014 гг. в рамках совместных российско-монгольских научных экспедиций. Пробы аэрозолей отбирали с помощью высокообъемного

пробоотборника на PM<sub>10</sub> фирмы Andersen Instruments Inc. (США) и аспиратора АВА 3-180-01А на фильтры Whatman-41, АФА-ХП. Аэрозольное вещество с фильтров извлекалось деионизированной водой (электропроводность 0,15–0,20 мкСм). В части раствора измеряли величину рН, оставшийся раствор фильтровали через ацетат-целлюлозный фильтр с диаметром пор 0,2 мкм и использовали для определения химического состава аэрозольных частиц. Измерения выполнялись с использованием атомно-абсорбционного спектрометра фирмы Carl Zeiss Iena (Германия), высокоэффективного жидкостного хроматографа «Милихром А-02» (Россия), ионного хроматографа ICS-3000 (Dionex, США) в аттестованной лаборатории Лимнологического института СО РАН. В приготовленных образцах проводилось определение ионов аммония (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), натрия (Na<sup>+</sup>), калия (K<sup>+</sup>), магния (Mg<sup>2+</sup>), кальция (Ca<sup>2+</sup>), нитратов (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), хлоридов (Cl<sup>-</sup>), сульфатов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), гидрокарбонатов (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), ацетатов (CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>), формиатов (HCOO<sup>-</sup>), метансульфонатов (CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub><sup>-</sup>), оксалатов (C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Качество выполняемых анализов неоднократно подтверждалось участием в межлабораторных сличительных испытаниях по международным программам «Глобальная химия атмосферы» (GAW) под эгидой ВМО и Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET), которые вошли в отчеты ВМО и EANET 23 [12, 13]. Для определения направлений переноса аэрозолей использовалась модель переноса воздушных масс HYSPLIT (Hybrid Single Particles Lagrangian Integrated Trajectory Model), разработанная NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, США) (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Изучение проб взвешенных частиц показало низкое содержание аэрозолей в атмосфере Улан-Батора в теплое время года, тогда как в холодный сезон концентрация аэрозолей сильно возрастает. В теплые месяцы 2013–2014 гг. отмечено повышение содержания аэрозольных частиц по сравнению с 2005–2006 гг. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Исследования 2005–2006 гг. показали, что наиболее загрязненной атмосфера в Улан-Баторе была вблизи ТЭЦ-3. Суммарное содержание ионов здесь достигало 34,7 мкг/м<sup>3</sup> на фоне 9,8–11,0 мкг/м<sup>3</sup> в других районах. Главные ионы в составе аэрозоля были представлены SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Учитывая, что перенос воздушных масс на высоте в тот период в основном осуществлялся с непромышленных территорий Восточной Сибири либо с высокогорных районов Саян, можно констатиро-

Таблица 1

**Статистические характеристики ионного состава аэрозоля г. Улан-Батора в теплые периоды 2005, 2006, 2013, 2014 гг., мкг/м<sup>3</sup>**

Год	Показатель	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Сумма
2005 (N=18)	max	0,51	2,53	0,18	0,29	6,85	2,38	—	2,37	3,48	—	17,81	—	—	—	34,69
	min	0,18	0,92	0,07	0,08	1,09	0,05	—	0,75	1,31	—	0,46	—	—	—	9,76
	Среднее	0,38	1,50	0,13	0,17	3,48	1,58	—	1,44	2,4	—	7,4	—	—	—	18,48
	СКО	0,13	0,90	0,06	0,11	2,92	0,97	—	0,84	1,09	—	9,18	—	—	—	—
2006 (N=24)	max	0,13	0,41	0,11	0,08	1,66	0,27	—	1,28	1,70	—	3,11	—	—	—	7,87
	min	0,12	0,11	0,11	0,08	1,34	0,24	—	0,63	1,23	—	2,27	—	—	—	7,01
	Среднее	0,12	0,26	0,11	0,08	1,50	0,26	—	0,96	1,46	—	2,69	—	—	—	7,44
	СКО	0,01	0,21	0,0034	0,0026	0,22	0,02	—	0,46	0,34	—	0,59	—	—	—	—
2013 (N=16)	max	3,79	0,15	1,78	0,83	2,98	9,73	0	4,44	5,03	0	0	—	—	—	24,71
	min	1,86	0,07	0,71	0,38	1,30	3,42	0	2,30	1,33	0	0	—	—	—	13,97
	Среднее	2,62	0,11	1,29	0,57	2,24	6,45	—	3,32	2,47	—	—	—	—	—	19,09
	СКО	0,85	0,03	0,45	0,18	0,73	2,87	—	0,78	1,48	—	—	—	—	—	—
2014 (N=24)	max	2,45	0,56	1,33	0,252	3,08	6,09	0,019	3,54	4,49	1,018	0	0,47	0,068	0,027	21,38
	min	0,24	0,03	0,48	0,008	0,17	1,10	0	0	0,34	0	0	0,12	0	0	2,71
	Среднее	0,87	0,21	0,85	0,36	1,05	3,14	0,008	0,48	1,27	0,12	—	0,32	0,02	0,004	8,43
	СКО	0,58	0,12	0,25	0,08	0,91	1,76	0,01	1,15	1,24	0,10	—	0,26	0,02	0,01	—

Примечание. Здесь и в табл. 2 и 3 «—» — нет данных; N — количество проб; СКО — среднеквадратическое отклонение.

Таблица 2

Сравнение химического состава аэрозоля в г. Улан-Баторе, август–сентябрь 2014 г., мкг/м<sup>3</sup>

Месяц	Показатель	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Сумма
Август (N = 10)	Среднее	0,64	0,25	0,88	0,3	0,49	2,52	0,05	0,06	0,87	0,26	0,237	0,002	0,003	0,001	6,29
	СКО	0,53	0,22	0,45	0,02	0,31	1,11	0,01	0,04	0,40	0,16	0,14	0,001	0,0008	0,0008	—
Сентябрь (N = 14)	Среднее	1,05	0,15	0,83	0,5	1,49	3,64	0,003	0,82	1,58	0,008	0,395	0,021	0,004	0,006	10,14
	СКО	0,59	0,09	0,21	0,09	0,65	1,47	0,007	0,52	1,63	0,008	0,22	0,017	0,003	0,005	—

Таблица 3

Статистические характеристики ионного состава аэрозоля г. Улан-Батора в зимний период 2011–2014 гг., мкг/м<sup>3</sup>

Год	Показатель	Li <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Сумма
2011 (N = 20)	max	2,4·10 <sup>-3</sup>	10,2	13,2	1,8	0,4	3,9	1,8	6,2	0,7	0,1	8,7	34,3	0,1	0	—	—	—	75,1
	min	0	3,6	0	0,6	0,01	0,6	0,4	1,4	0,3	0	1,9	7,9	0	0	—	—	—	19,4
2012 (N = 24)	Среднее	7,1·10 <sup>-4</sup>	5,8	5,8	1,1	0,2	2,0	0,9	2,6	0,5	0,01	4,2	20,7	0,01	0	—	—	—	43,9
	СКО	8,3·10 <sup>-4</sup>	1,87	3,07	0,42	0,15	1,06	0,49	1,19	0,16	0,04	1,88	6,21	0,04	—	—	—	—	—
2013 (N = 24)	max	2,8·10 <sup>-3</sup>	16,4	0	12,9	7,3	43,6	1,1	20,4	10,7	0	17,3	21,9	68,8	64,9	—	—	—	231,3
	min	0	4,9	0	0	2,9	8,4	0	6,6	1,1	0	9,1	8,2	0	0	—	—	—	56,4
2014 (N = 24)	Среднее	9,9·10 <sup>-4</sup>	9,0	0	4,4	5,0	19,4	0,3	12,1	5,1	0	13,7	14,9	5,6	25,1	—	—	—	114,6
	СКО	1,2·10 <sup>-3</sup>	3,34	—	2,95	1,29	8,95	0,35	3,98	3,20	—	2,83	3,74	18,27	21,04	—	—	—	—
2013 (N = 24)	max	0	17,7	0	1,3	0,3	4,2	0,8	9,1	7,7	0,3	4,5	34,0	5,1	0	—	—	—	81,1
	min	0	15,1	0	0,7	0,2	2,0	0,5	6,2	0	0	0,1	22,5	0	0	—	—	—	56,2
2014 (N = 28)	Среднее	0	16,5	0	0,9	0,2	3,0	0,7	7,4	3,5	0,1	1,3	28,7	1,2	0	—	—	—	68,7
	СКО	—	0,93	—	0,18	0,05	0,81	0,06	0,86	2,37	0,13	1,55	4,49	2,19	—	—	—	—	—
2014 (N = 28)	max	0	18,2	17,4	3,5	0,5	2,7	1,1·10 <sup>-2</sup>	24,7	2,8	0,6	6,2	45,3	0,4	0	3·10 <sup>-2</sup>	1,5·10 <sup>-1</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	117,4
	min	0	6,1	3,8	1,3	0,10	0,8	0	6,5	0	0	0	19,1	0	0	3·10 <sup>-3</sup>	6·10 <sup>-2</sup>	0	41,9
2014 (N = 28)	Среднее	0	9,1	8,0	1,9	0,2	1,7	1,5·10 <sup>-3</sup>	11,3	1,0	0,3	2,3	28,8	0,02	0	7,9·10 <sup>-3</sup>	8,3·10 <sup>-2</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>	64,7
	СКО	—	3,45	3,51	0,75	0,09	0,66	0,003	4,71	0,69	0,34	1,99	7,84	0,09	—	0,006	0,03	0,0002	—

вать, что источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферу были региональными или же располагались в самом городе. В летний период это могут быть как промышленные предприятия, так и транспорт. Наблюдается различие химического состава аэрозоля, отобранного в центре города и на его окраине. В первом случае фиксируются более высокие концентрации гидрокарбонатов и сульфатов — продуктов неполного сгорания топлива автомобилей и ТЭЦ. В составе аэрозоля, отобранного на окраине города, отмечаются повышенные концентрации нитратов и хлоридов, что, возможно, связано с переносом минеральной пыли. Значительное влияние на химический состав аэрозоля оказывают метеорологические и синоптические процессы. Так, в 2006 г. вследствие дождливой погоды наблюдались более низкие концентрации суммарного содержания ионов в аэрозоле ( $7,0\text{--}7,9\text{ мкг/м}^3$ ), чем при сухой погоде в 2005 г. ( $9,8\text{--}34,7\text{ мкг/м}^3$ ).

В теплый период 2013 г. сумма ионов в аэрозоле повысилась по сравнению с 2005–2006 гг., преобладали ионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , причем заметно возросло содержание  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ , что может быть связано с индустриальными выбросами. Из состава аэрозоля исчезли ионы  $\text{HCO}_3^-$ , имеющие в основном естественное происхождение или содержащиеся в золе. Это связано с ростом содержания соединений серы и азота в воздухе, что ведет к подкислению среды и исчезновению  $\text{HCO}_3^-$  из аэрозолей [14]. Такие изменения обусловлены увеличением количества сжигаемого топлива выбросов от автотранспорта и предприятий в связи с ростом города.

Отбор аэрозольного вещества в 2014 г. проводился в жилых кварталах (август) и в ходе маршрутных измерений у автодорог (сентябрь), результаты измерений представлены в табл. 2.

В период исследований шли дожди, что привело к снижению содержания аэрозольных частиц и повлияло на их химический состав. Сумма ионов в аэрозоле составила  $5,7\text{--}8,9\text{ мкг/м}^3$  (13–14.09.2014), в то время как в пробе, взятой в ясный день (11.09), сумма ионов достигла  $21,4\text{ мкг/м}^3$ . Вымывание осадками привело к снижению концентраций  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ . В пробах, отобранных в августе, доминировали ионы  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , основные источники которых — объекты коммунальной сферы, строительства, а также минеральная пыль. В сентябре в аэрозолях значительно возросло содержание  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ , присутствующих в выбросах продуктов сгорания топлива и в дорожной пыли [15, 16]. Содержание других ионов снизилось или осталось на прежнем уровне. Несмотря на различие метеорологических условий в сентябре 2013 и 2014 гг., отмечена идентичность химического состава аэрозоля, что свидетельствует о схожести источников его формирования.

В 2014 г. проанализирован ряд органических ионов в аэрозолях. Среднее содержание ацетат-ионов в августе составило  $0,24\text{ мкг/м}^3$ , в сентябре —  $0,39\text{ мкг/м}^3$ , метансульфонат-ионов —  $0,003$  и  $0,021\text{ мкг/м}^3$ , оксалат-ионов —  $0,001$  и  $0,006\text{ мкг/м}^3$  соответственно. Наличие этих ионов может быть обусловлено как естественными процессами (жизнедеятельность растений, фотохимические превращения), так и антропогенными (выбросы автотранспорта, сжигание древесины и др.) [17].

В зимний период, по сравнению с теплым, содержание загрязняющих примесей в составе атмосферы значительно возрастает, к основным источникам выбросов присоединяется топливно-энергетический комплекс. Зимой пункт отбора проб атмосферного аэрозоля был расположен в центре города в удалении от автомагистрали и промышленных объектов, недалеко от торгового центра «Их дэлгуур». Статистические характеристики ионного состава аэрозоля в этот период представлены в табл. 3.

Отмечаются межгодовые различия в составе аэрозоля. Так, в декабре 2011 г. суммарное содержание в нем ионов составило в среднем  $43,9\text{ мкг/м}^3$ , в 2012 г. —  $114,6$ , в 2013 г. —  $68,7$ , в 2014 г. —  $64,7\text{ мкг/м}^3$ . Преобладали ионы  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ . Концентрация суммы ионов в аэрозоле зимнего периода более чем в шесть раз выше, чем летом. Наибольшее превышение концентраций отмечено для ионов щелочных металлов  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  и ионов щелочно-земельных металлов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  (более чем в 20 раз), входящих в состав зольных компонентов.

Используя направления переноса воздушных масс с помощью траекторной модели HYSPLIT, подробно рассмотрим химический состав аэрозоля, отобранного в холодные периоды разных лет в зависимости от метеорологических и синоптических процессов. Вынос воздушных масс в район Улан-Батора происходит в основном из слабоосвоенных западных или северо-западных районов Монголии. Следовательно, состав аэрозоля формируется в основном под воздействием региональных источников. Отмечена также зависимость содержания и состава атмосферных аэрозолей от локальных источников выбросов, расположенных в различных частях города.

В зимний период 2011 г. при прохождении 20–21 декабря теплого атмосферного фронта, выразившегося в увеличении среднесуточной температуры с  $-26,4$  (19.12) до  $-20,6$  °C (21.12), среднесуточного атмосферного давления с 656 до 658 мм рт. ст. и выпадении снега вечером 20 декабря, отмечены значительные различия в составе растворимой фракции аэрозоля. Наблюдались как максимальные

(75,13 мкг/м<sup>3</sup>, днем 20.12), так и минимальные (19,35 мкг/м<sup>3</sup>, днем 21.12) суммарные концентрации ионов в аэрозольном веществе. Рост концентраций NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в аэрозоле отмечался в первой половине дня 20 декабря при устойчивом западном ветре и переносе выбросов в пункт наблюдения от электростанций, заводов и автодорог, расположенных в западной части города. Выпадение осадков привело к снижению концентрации ионов взвешенных частиц вследствие их вымывания из атмосферы. После прохождения атмосферного фронта массовая концентрация аэрозоля и химический состав растворимой фракции были близки к среднегодовым параметрам.

В декабре 2012 г. зафиксированы наибольшие суммарные концентрации ионов в составе аэрозоля за весь период проведенных измерений. В период с 9 по 12 декабря 2012 г. наблюдался выраженный перенос примесей с восточным ветром при низкой температуре воздуха. При этом в центральную часть Улан-Батора поступали выбросы от угольных предприятий, расположенных к востоку от центра города. Суммарная концентрация ионов в аэрозоле достигала 127,9–231,3 мкг/м<sup>3</sup>. Отмечен рост концентраций ионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>. При смене направления ветра на северо-западное (20–22.12.2012 г.) и выпадении осадков содержание ионов в аэрозоле снизилось в 1,5–2 раза и в общей сумме составило 56,43–103,61 мкг/м<sup>3</sup>.

В период измерений в декабре 2013 г. в 40 % случаев наблюдались штилевые условия погоды либо, как и в 2012 г., с восточного направления фиксировался слабый ветер со скоростью до 3–4 м/с. Средняя сумма ионов была выше в 1,6 раза по сравнению с 2011 г. и в 1,7 раза ниже, чем в 2012 г., с доминированием ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>. Из-за преобладания штилевой погоды состав аэрозолей формировался преимущественно за счет локальных источников, при этом отсутствие ветра не способствовало рассеиванию примесей в атмосфере и суммарное содержание ионов изменялось в основном в пределах 51,4–76,1 мкг/м<sup>3</sup>. Некоторое повышение концентраций ионов отмечалось также при южном или юго-восточном ветре.

В декабре 2014 г., как и в 2013 г., также господствовали штилевые эпизоды, благоприятствующие накоплению примесей от локальных источников и снижающие перенос примесей из других районов, либо наблюдался юго-западный и западный ветер со скоростью 1–5 м/с, приносящий примеси со стороны электростанций. Качественный состав аэрозоля был схож с отобраным в зимние периоды 2011 и 2013 гг., в нем преобладали SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Характерно, что при юго-западном переносе примесей возрастали концентрации SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (45,3 мкг/м<sup>3</sup>) и NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (3,5 мкг/м<sup>3</sup>). Выпадение снега способствовало очищению атмосферы, концентрация SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> при этом снизилась до 19,1, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> — до 0,2 мкг/м<sup>3</sup>.

Сходные метеорологические условия при отборе проб в 2013 и 2014 гг. позволили выявить, что со сменой преобладающего направления ветра качественный состав аэрозоля в Улан-Баторе изменяется. Так, например, с западным и юго-западным ветром в центр города переносятся выбросы от угольной электростанции, располагающейся в юго-западной части города. Это приводит к росту концентраций ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> и Ca<sup>2+</sup> в составе аэрозоля за счет продуктов сжигания угля [18, 19]. Северо-западный перенос воздушных масс способствует очищению атмосферы. Частые штилевые эпизоды или слабый ветер способствуют накоплению примесей в воздухе монгольской столицы.

Сравнительный анализ аэрозолей теплого и холодного периодов показал: при одинаковых естественных условиях топливно-энергетический комплекс в Улан-Баторе значительно влияет на химический состав аэрозоля. Так, например, в декабре 2013 г. в отопительный сезон сумма ионов повышается в 3,5 раза, в 2014 г. — в 10,3 раза. При этом содержание ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в 2013 г. выросло в 9,7 раза, Na<sup>+</sup> — в 6,2, Ca<sup>2+</sup> — в 1,3, Cl<sup>-</sup> — в 1,2 раза, в 2014 г. — в 33,2, 14,3, 3,5 и 4,5 раза соответственно. В меньшей степени изменились концентрации ионов K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>, C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Не следует также забывать о существенном влиянии выбросов автотранспорта на изменение химического состава аэрозоля как в теплый, так и в холодный период года.

По уровню концентраций химических компонентов в составе аэрозоля в зимний период Улан-Батор сопоставим с крупными промышленными центрами Китая, такими как г. Урумчи с населением свыше 3 млн чел. Ниже представлены усредненные данные химического состава аэрозоля в г. Урумчи в 2004–2007 гг. [20] и в столице Монголии за декабрь 2011–2014 гг.

Город	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
Улан-Батор	9,90	3,92	2,10	1,36	6,30	0,42	8,74	2,39	5,27	23,61	6,05
Урумчи	3,74	29,43	2,46	0,93	10,08	1,22	9,66	0,49	12,28	63,08	35,43

Данные города расположены в засушливых регионах с резко континентальным климатом с холодной зимой и жарким летом. Основные источники выбросов в них — энергетика, транспорт, промышленность и бытовая сфера. В обоих городах природа аэрозолей определяется влиянием антропо-

генных выбросов и переносом минеральной пыли. Застойные явления в атмосфере в зимний сезон при росте потребления угля для отопления способствуют накоплению атмосферных примесей и усилению загрязнения. В Урумчи отмечено более высокое содержание взвешенных частиц, что связано с большей площадью и уровнем экономического развития города и, соответственно, более сильным антропогенным загрязнением. В Улан-Баторе значительно ниже концентрации главных ионов в составе аэрозоля —  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , образующихся вследствие сжигания топлива. В то же время содержание  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , имеющих частично или полностью естественное происхождение, в монгольской столице превосходит или сопоставимо с показателями для Урумчи. Высокая концентрация  $\text{NO}_2^-$  в Улан-Баторе объясняется значительным уровнем автомобилизации города. Среднее содержание мелкодисперсной фракции аэрозолей  $\text{PM}_{10}$  в Урумчи в зимний период 2004–2006 гг. (305,6–412,8 мкг/м<sup>3</sup>) [20] превосходит ее содержание в столице Монголии (237 мкг/м<sup>3</sup>, январь 2008 г.) [7]. Высокое содержание карбонат-ионов  $\text{CO}_3^-$  в Урумчи обусловлено влиянием пыльных бурь.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главные ионы в атмосферных аэрозолях Улан-Батора —  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ . Показано, что основное влияние на формирование аэрозоля в атмосфере Улан-Батора оказывают коммунальная сфера и энергетика, где используются уголь и дрова. Увеличение потребления топлива в холодный период в совокупности с особенностями климата и рельефа местности приводит к значительному росту содержания взвешенных частиц в атмосфере: сумма ионов возрастает в 10,3 раза по сравнению с теплым периодом. В декабре 2014 г. наблюдалось увеличение содержания  $\text{SO}_4^{2-}$  в 33,2 раза по сравнению с теплым сезоном,  $\text{Na}^+$  — в 14,3,  $\text{Ca}^{2+}$  — в 3,5,  $\text{Cl}^-$  — в 4,5 раза.

Выявлены различия в химическом составе проб аэрозольных частиц, отобранных в разных районах города. В центре, где основной источник аэрозоля — коммунальный сектор, в пробах преобладают ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ , на окраине —  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{Cl}^-$ . Вблизи дорог, где наблюдались высокие концентрации  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CH}_3\text{SO}_3^-$ ,  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ , аэрозоль формируется за счет выхлопов двигателей и подъема пыли от дорог и автомобилей.

Показана зависимость концентрации взвешенных частиц от метеоусловий. При выпадении осадков снижается содержание аэрозолей вследствие вымывания из атмосферы. Рост концентраций ионов в составе аэрозоля наблюдается при западном, юго-западном или восточном ветрах. Состав аэрозолей в Улан-Баторе схож с составом в городах Китая, расположенных в одинаковых географических и климатических условиях.

*Работа выполнена в рамках госзадания ФАНО России (0336–2016–0001) и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18–55–81001–ЕАПИ\_а).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Стариков А.В., Цыдыпов В.В., Аюржанаев А.А., Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Ходжер Т.В. Химический состав аэрозолей в атмосфере Монголии // Метеорология и гидрология. — 2012. — № 8. — С. 59–68.
2. Amarsaikhan D., Battengel V., Nergui B., Ganzorig M., Bolor G. A study on air pollution in Ulaanbaatar city // Mongolia Journal of Geoscience and Environment Protection. — 2014. — Vol. 2, N 2. — P. 123–128.
3. Davy P.K., Gunchin G., Markwitz A. Air particulate matter pollution in Ulaanbaatar, Mongolia: determination of composition. Source contributions and source locations // Atmospheric Pollution Research. — 2011. — Vol. 2. — P. 126–137.
4. Сорокина О.И., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Голованов Д.Л., Бажа С.Н., Доржготов Д., Энх-Амгалан С. Тяжелые металлы в воздухе и снежном покрове Улан-Батора // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 3. — С. 159–170.
5. Country Synthesis Report on Urban Air Quality Management. Mongolia. Discussion Draft, December. — 2006. — 20 p. [Электронный ресурс]. — [http://www.academia.edu/7988261/Country\\_synthesis\\_report\\_on\\_urban\\_air\\_quality\\_management\\_Mongolia](http://www.academia.edu/7988261/Country_synthesis_report_on_urban_air_quality_management_Mongolia) (дата обращения 17.01.2017).
6. Zamba B. Fragile Environment, Vulnerable People and Sensitive Society. — Tokyo: KAIHATU-SHA Co., Ltd, 2007. — 224 p.
7. Nishikawa M., Matsui I., Batdorj D., Jugder D., Mori I., Shimizu A., Sugimoto N., Takahashi K. Chemical composition of urban airborne particulate matter in Ulaanbaatar // Atmospheric Environment. — 2011. — Vol. 45. — P. 5710–5715.

8. **Fan P., Chen J., John R.** Urbanization and environmental change during the economic transition on the Mongolian Plateau: Hohhot and Ulaanbaatar // *Environmental Research*. — 2016. — Vol. 144. — P. 96–112.
9. **Ganbat G., Han J.-You., Ryu You.-H., Baik J.-J.** Characteristics of the Urban Heat Island in a High-Altitude Metropolitan City, Ulaanbaatar, Mongolia Asia-Pacific // *Journ. Atmos. Sci.* — 2013. — Vol. 49, N 4. — P. 535–541.
10. **Jung J., Tsatsral B., Kim You. J., Kawamura K.** Organic and inorganic aerosol compositions in Ulaanbaatar, Mongolia, during the cold winter of 2007 to 2008: Dicarboxylic acids, ketocarboxylic acids, and  $\alpha$ -dicarbonyls // *Journ. of Geophysical Research*. — 2010. — Vol. 115 [Электронный ресурс]. — <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JD014339> (дата обращения 09.10.2015).
11. **Guttikunda S. K., Lodoysamba S., Bulgansaikhan B., Dashdondog B.** Particulate pollution in Ulaanbaatar, Mongolia // *Air Qual. Atmos. Health*. — 2013. — Vol. 6, N 3. — P. 589–601.
12. **Report of the Inter-Laboratory Comparison Project 1998-2015** [Электронный ресурс]. — <http://www.eanet.asia/product/index.html> (дата обращения: 17.01.2017).
13. **Technical Manual on Dry Deposition Flux Estimation in East Asia** [Электронный ресурс]. — <http://www.eanet.asia/product/index.html> (дата обращения 17.01.2017).
14. **Liu X., Zhu J., Van Espen P., Adams F., Xiao R., Dong Sh., Li Yu.** Single particle characterization of spring and summer aerosols in Beijing: Formation of composite sulfate of calcium and potassium // *Atmospheric Environment*. — 2005. — Vol. 39. — P. 6909–6918.
15. **Yan J., Chen L., Lin Q., Li Zh., Chen H., Zhao Sh.** Chemical characteristics of submicron aerosol particles during a long-lasting haze episode in Xiamen, China // *Atmospheric Environment*. — 2015. — Vol. 113. — P. 118–126.
16. **Zannoni D., Valotto G., Visin F., Rampazzo G.** Sources and distribution of tracer elements in road dust: The Venice mainland case of study // *Journ. of Geochemical Exploration*. — 2016. — Vol. 166. — P. 64–72.
17. **Wang Y., Zhuang G., Tang A., Yuan H., Sun Y., Chen Sh., Zheng A.** The ion chemistry and the source of PM<sub>2.5</sub> aerosol in Beijing // *Atmospheric Environment*. — 2005. — Vol. 39. — P. 3771–3784.
18. **Zikova N., Wang Yu., Yang F., Li X., Tian M., Hopke Ph.K.** On the source contribution to Beijing PM<sub>2.5</sub> concentrations // *Atmospheric Environment*. — 2016. — Vol. 134. — P. 84–95.
19. **Cheng M.-Ch., You Ch.-F., Cao J., Jin Zh.** Spatial and seasonal variability of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> aerosols in 14 major cities in China // *Atmospheric Environment*. — 2012. — Vol. 60. — P. 182–192.
20. **Li J., Zhuang G., Huang K., Lin Y., Xu Ch., Yu Sh.** Characteristics and sources of air-borne particulate in Urumqi, China, the upstream area of Asia dust // *Atmospheric Environment*. — 2008. — Vol. 42. — P. 776–787.

*Поступила в редакцию 21 сентября 2017 г.*