

# Изменчивость содержания диоксида серы в атмосфере над Казахстаном по данным наземных наблюдений и спутникового зондирования

А.Х. Ахмеджанов, Н.Д. Ахметов, Т.К. Караданов\*

АО «Национальный центр космических исследований и технологий» АК МОАП РК  
050010, г. Алматы, ул. Шевченко 15, Казахстан

Поступила в редакцию 4.03.2019 г.

На основе данных измерительной сети наземных наблюдений в городах Казахстана проведен статистический анализ приземной концентрации диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ); его максимальные концентрации наблюдаются в таких крупных промышленных городах, как Алматы, Усть-Каменогорск, Риддер, Темиртау и Талды-Курган. Проведен анализ содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана на основе спутниковых данных, обработанных системой реанализа MERRA-2. Определены внутригодовые изменения содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана за последние 10 лет. Анализ многолетних изменений содержания  $\text{SO}_2$  показал тенденцию к его уменьшению.

*Ключевые слова:* концентрация, малые газы, диоксид серы, атмосфера, спутник, зондирование; concentration, greenhouse gases, sulfur dioxide, atmosphere, satellite, remote sensing.

## Введение

Вследствие антропогенной деятельности в атмосферу попадает значительное количество серы, главным образом в виде диоксида. Диоксид серы относится к газам, которые в результате химических реакций в атмосфере довольно быстро распадаются, поэтому их концентрации непостоянны. Продолжительность существования  $\text{SO}_2$  в атмосфере невелика: от двух-трех недель (если воздух относительно сухой и чистый) до нескольких часов. Это соединение, растворяясь в каплях атмосферной влаги, образует раствор серной кислоты, что увеличивает агрессивность выбросов серы. Перенос  $\text{SO}_2$  происходит на высоте от 750 до 1500 м, где средние скорости близки к 10 м/с.

В последние годы при решении задач количественной и качественной оценок распространения газов, загрязняющих атмосферу, применяются данные спутникового зондирования Земли из космоса. Анализ этих данных позволяет выявить их источники и исследовать крупномасштабные загрязнения атмосферы, определить особенности сезонного хода и трендов в разных регионах.

Спутниковая информация активно используется для восстановления концентраций различных газов в атмосфере. На основе этих данных осуществляется мониторинг их содержания на востоке России [1]; выполнены оценки накопления и пере-

мещения диоксидов азота и серы в Армении [2]; получены карты рисков загрязнения атмосферы Украины  $\text{SO}_2$  и аэрозолем [3]. Оценка выбросов диоксида серы в атмосферу на основе спутниковых методов контроля в районе Норильской промышленной зоны сделана в [4]. Разработан аналитический метод оценки вертикального профиля выбросов  $\text{SO}_2$  на основе данных дистанционного зондирования [5]. По данным с сенсора OMI, аэрозольного лидара и исследовательского спутника CALIPSO исследованы состав, структура и долговечность стратосферного  $\text{SO}_2$  после незначительного извержения вулкана Суфриер-Хилс 20.05.2006 г. [6].

Цель нашей работы – изучение состояния  $\text{SO}_2$  вне городов и промышленных объектов, попадающего в атмосферу в результате степных и лесных пожаров, а также из других техногенных источников.

## Данные наземных наблюдений

В системе национальной гидрометеорологической службы наблюдения за состоянием окружающей среды Казгидромет проводится ее мониторинг в соответствии с Экологическим кодексом Республики Казахстан, включающий в себя наблюдения за загрязнением наземного атмосферного воздуха во всех крупных населенных пунктах. Выпущены информационные бюллетени о состоянии окружающей среды за 2017 и 2018 гг. с данными измерений загрязняющих веществ в атмосфере во всех городах Республики Казахстан [7].

На основе этих данных был выполнен статистический анализ наземного содержания  $\text{SO}_2$

\* Алшин Хакимович Ахмеджанов (model\_lab@mail.ru); Нурлан Дүйсеналиевич Ахметов (model\_lab@mail.ru); Талап Касенович Караданов (math@spaceres.kz).

в воздушном бассейне Казахстана. Результаты анализа (табл. 1) во всех городах показали, что самые высокие концентрации  $\text{SO}_2$  наблюдаются в Алматы, Усть-Каменогорске, Риддере, Темиртау и Талды-Кургане. По средним значениям концентрации  $\text{SO}_2$  выделяется Усть-Каменогорск (порядка  $0,1 \text{ мг/м}^3$ ), в гг. Алматы, Риддере и Темиртау она примерно одинакова (порядка  $0,05 \text{ мг/м}^3$ ), в Талды-Кургане — около  $0,035 \text{ мг/м}^3$ .

Стандартные ошибки распределения концентрации  $\text{SO}_2$  следующие: в Усть-Каменогорске наблюдается их максимум, в Алматы и Темиртау они примерно одинаковы и вдвое меньше, чем в Усть-Каменогорске; минимум в Талды-Кургане. Медиана и мода распределения концентрации сернистого газа по гг. Алматы, Риддер и Темиртау примерно одинаковы, максимум в Усть-Каменогорске и минимум в Талды-Кургане.

Стандартное отклонение распределений  $\text{SO}_2$ : максимум — Усть-Каменогорск; минимум — Риддер. Правосторонняя асимметрия распределений концентрации  $\text{SO}_2$  наблюдается во всех рассматриваемых городах. Острове́ршинность распределений отмечается во всех городах, кроме Алматы. Отрицательное значение эксцесса отмечается в распределении  $\text{SO}_2$

в Алматы, что означает более пологий график распределения.

Изменения концентрации  $\text{SO}_2$  в воздушных бассейнах рассматриваемых городов за 2017–2018 гг. показаны на рис. 1. Диапазон изменений концентраций  $\text{SO}_2$  от  $0,01$  до  $0,09 \text{ мг/м}^3$  соответствует всем пунктам наблюдений, кроме Усть-Каменогорска, где диапазон составляет от  $0,058$  до  $0,259 \text{ мг/м}^3$ . Тренд концентраций  $\text{SO}_2$  по этому городу имеет тенденцию к понижению от  $0,112$  до  $0,105 \text{ мг/м}^3$ .

## Данные спутникового зондирования

Для анализа содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана использовались спутниковые данные, обработанные системой MERRA-2 за период с 1979 г. по февраль 2019 г.

По этим данным были определены внутригодовые изменения содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана за последние 10 лет (рис. 2). Содержание  $\text{SO}_2$  максимально в зимние месяцы, а минимально в теплое время года. Максимум в летнее время выпал на 2010 г., когда на европейской территории России наблюдалась

Таблица 1  
Результаты статистического анализа данных наземных наблюдений  $\text{SO}_2$ ,  $\text{мг/м}^3$

Показатель	Алматы	Усть-Каменогорск	Риддер	Темиртау	Талды-Курган
Среднее	0,052	0,107667	0,04925	0,049938	0,035083
Стандартная ошибка	0,004188	0,010684	0,001696	0,004361	0,006627
Медиана	0,0475	0,0975	0,048	0,046	0,0225
Мода	0,04	0,113	0,048	0,046	0,02
Стандартное отклонение	0,020517	0,052339	0,008311	0,021364	0,032468
Дисперсия выборки	0,000421	0,002739	6,91E-05	0,000456	0,001054
Эксцесс	-0,11144	2,312967	1,077844	4,095702	9,159538
Асимметричность	0,655245	1,527607	0,959099	1,764271	2,846639
Интервал	0,077	0,201	0,033	0,101	0,145
Минимум	0,026	0,058	0,036	0,019	0,014
Максимум	0,103	0,259	0,069	0,12	0,159
Уровень надежности (95,0%)	0,008664	0,022101	0,003509	0,009021	0,01371

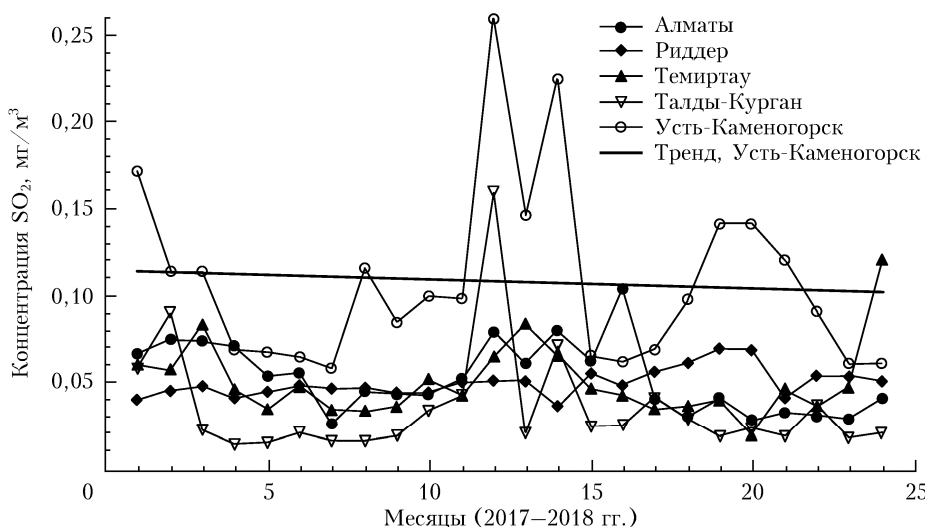


Рис. 1. Изменения концентрации  $\text{SO}_2$  в атмосфере Алматы, Риддера, Темиртау, Талды-Кургана и Усть-Каменогорска по данным наземных наблюдений

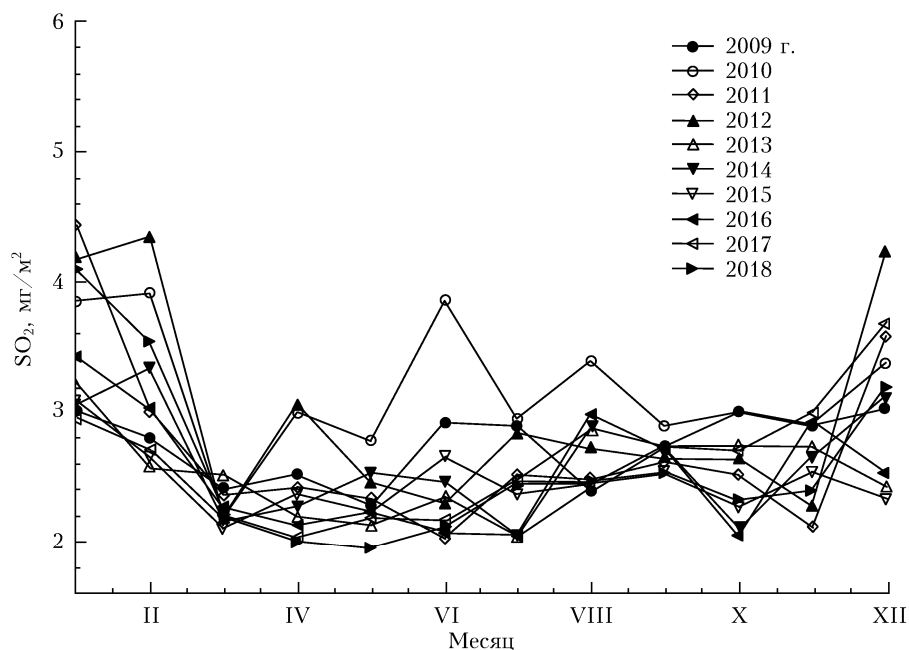


Рис. 2. Внутригодовые изменения содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана в 2009–2018 гг. по данным спутникового зондирования

температурная аномалия [8]. Результаты статистического анализа содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе по Казахстану представлены в табл. 2: среднее значение находится в диапазоне от  $2,46 \text{ мг/м}^2$  в 2015 г. до  $3,16 \text{ мг/м}^2$  в 2010 г.; стандартная ошибка — от  $0,07 \text{ мг/м}^2$  в 2009 и 2015 гг. до  $0,23 \text{ мг/м}^2$  в 2012 г.; медиана — от  $2,38 \text{ мг/м}^2$  в 2016 г. до  $2,99 \text{ мг/м}^2$  в 2010 г. Максимальное содержание  $\text{SO}_2$  наблюдалось в 2010 и 2012 гг. вследствие аномально высоких температур в летние периоды на территории Казахстана.

На основе анализа спутниковых данных содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе с 1980 по 2018 г. на территории Казахстана были определены многолетние изменения и тренд  $\text{SO}_2$  (рис. 3). Наблюдается тенденция к уменьшению содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе по Казахстану: за указанный период оно уменьшилось на 9,5%.

Среднее территориальное распределение содержания  $\text{SO}_2$  ( $\text{мг/м}^2$ ) в атмосферном столбе над

территорией Казахстана по данным спутникового зондирования за 2018 г. показано на рис. 4. Районы повышенного содержания  $\text{SO}_2$  согласуются с данными наземных наблюдений (см. рис. 1). Наибольший максимум  $\text{SO}_2$  наблюдается на востоке Казахстана (Усть-Каменогорск, Риддер), локальные максимумы — на северо-востоке Центрального Казахстана (Темиртау) и юге-востоке (Алматы).

## Заключение

По данным наземных наблюдений в крупных городах Казахстана диапазон изменений концентраций  $\text{SO}_2$  находятся в пределах от  $0,01$  до  $0,09 \text{ мг/м}^3$ . В Усть-Каменогорске содержание  $\text{SO}_2$  изменяется от  $0,058$  до  $0,259 \text{ мг/м}^3$  с тенденцией к понижению. Среднегодовые значения содержания диоксида серы составляют от  $2,43$  до  $2,73 \text{ мг/м}^2$ , только в 2010 г. это значение достигло  $3,16 \text{ мг/м}^2$ .

Таблица 2

Статистический анализ содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над Казахстаном по спутниковым данным. Единицы измерения структурных средних, экстремумов —  $\text{мг/м}^2$

Показатель	Год										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Среднее	2,73	3,16	2,69	2,98	2,50	2,60	2,46	2,52	2,63	2,60	
Стандартная ошибка	0,07	0,14	0,19	0,23	0,09	0,12	0,07	0,13	0,13	0,19	
Медиана	2,84	2,99	2,48	2,67	2,46	2,59	2,40	2,38	2,69	2,42	
Стандартное отклонение	0,26	0,51	0,68	0,80	0,32	0,42	0,25	0,47	0,46	0,66	
Дисперсия выборки	0,07	0,26	0,46	0,64	0,10	0,18	0,06	0,22	0,21	0,43	
Экссесс	-1,27	-0,28	3,34	-0,66	0,85	-1,13	2,23	-0,91	0,80	1,10	
Асимметричность	-0,60	-0,03	1,83	0,97	0,70	0,22	1,14	0,59	0,73	1,36	
Интервал	0,74	1,73	2,40	2,16	1,18	1,28	0,98	1,39	1,64	2,15	
Минимум	2,28	2,18	2,03	2,16	2,03	2,03	2,09	2,03	2,02	1,93	
Максимум	3,02	3,91	4,43	4,33	3,22	3,32	3,08	3,43	3,67	4,09	
Уровень надежности (95,0%)	0,17	0,32	0,43	0,50	0,20	0,27	0,16	0,30	0,29	0,41	

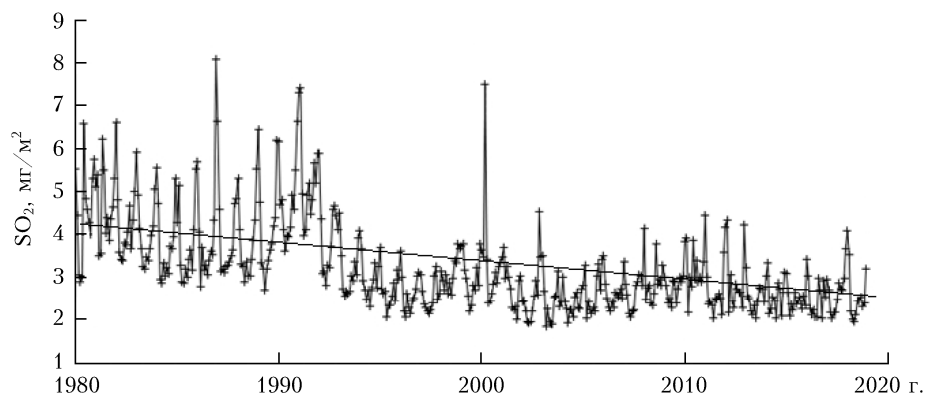


Рис. 3. Многолетние изменения содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана по спутниковым данным с 1980 по 2018 г.

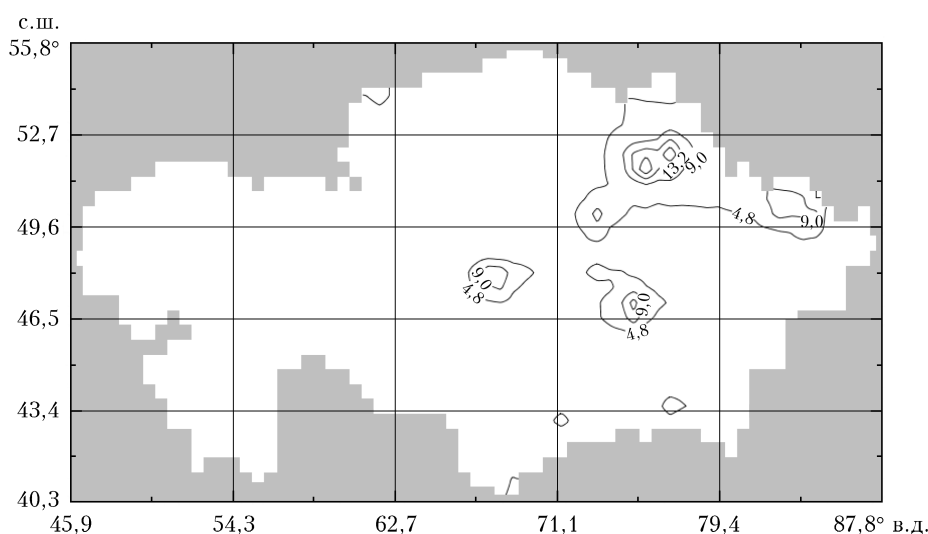


Рис. 4. Среднее территориальное распределение содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана по данным спутникового зондирования за январь 2019 г.,  $\text{mg}/\text{m}^2$

Анализ внутригодовых изменений содержания  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана в 2009–2018 гг. по данным спутникового зондирования показал, что максимум наблюдается в холодное время года, а минимум — в теплое. Локальный максимум наблюдался в 2010 г., в год аномально жаркого лета. Среднее распределение концентрации  $\text{SO}_2$  по территории Казахстана по данным спутникового зондирования за 2018 г. выявило наибольший максимум концентрации  $\text{SO}_2$  на востоке (Усть-Каменогорск, Риддер), а локальные максимумы на северо-востоке (Темиртау) и юго-востоке (Алматы). Общее содержание  $\text{SO}_2$  в атмосферном столбе над территорией Казахстана с 1980 по 2018 г. уменьшилось на 9,5%.

1. Филей А.А. Мониторинг содержания газов в атмосфере на основе данных ДЗЗ в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. С. 71–80.
2. Станкевич С.А., Налбандян М.А., Андреасян Д.М., Титаренко О.В. Оценка накопления, пространствен-

ного распределения и перемещения диоксидов азота и серы в атмосфере бассейна реки Дебед по материалам дистанционного зондирования Земли и возможные риски для здоровья населения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 240–249.

3. Родригес Залетинос Р.А., Аверин Г.В. Экологический анализ содержания диоксида серы и аэрозоля в атмосферном воздухе над территорией Украины // Вестн. Автомобильно-дорожного ин-та. 2012. № 2. С. 231–237.
4. Зуев Д.В., Кашкин В.Б. Анализ выбросов диоксида серы по данным инструмента OMI (спутник AURA) для Норильской промышленной зоны // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 9. С. 793–797.
5. Eckhardt S., Prata A.J., Seibert P., Stebell K., Stohl A. Estimation of the vertical profile of sulfur dioxide injection into the atmosphere by a volcanic eruption using satellite column measurements and inverse transport modeling // Atmos. Chem. Phys. 2008. N 8. P. 3881–3897.
6. Carn S.A., Krotkov N.A., Yang K., Hoff R.M., Prata A.J., Krueger A.J., Loughlin S.C., Levelt P.F. Extended observations of volcanic  $\text{SO}_2$  and sulfate aerosol in the stratosphere // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. N 7. P. 2857–2871.



7. Информационные бюллетени о состоянии окружающей среды 2017-2018 гг. РГП Казгидромет МЭ РК. URL: <https://kazhydromet.kz/ru/bulleten/okrsreda> (дата обращения: 28.01.2019).

8. Сидоренков Н.С., Сумерова К.А. Биения колебаний температуры как причина аномально жаркого лета 2010 г. на европейской территории России // Метеорол. и гидрол. 2012. № 6. С. 81–94.

*A.Kh. Akhmedjanov, N.D. Akhmetov, T.K. Kardanov.* **Variability of atmospheric SO<sub>2</sub> over Kazakhstan according to ground-based and satellite measurements.**

A statistical analysis of the ground concentration of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) was carried out based on the measuring network of observations data in the cities of Kazakhstan. The highest concentrations are observed in large industrial cities. In large cities, the range of changes in sulfur dioxide concentrations from 0.01 to 0.09 mg/m<sup>3</sup>. In Ust-Kamenogorsk the content of dioxide varies in the range from 0.058 to 0.259 mg/m<sup>3</sup> with a downward trend. Sulfur dioxide content analysis in the atmospheric column over the territory of Kazakhstan using reanalysis system MERRA 2. The annual sulfur dioxide average content vary from one of 2.43 to 2.73 mg/m<sup>2</sup>, in 2010 this value reached to 3.16 mg/m<sup>2</sup>. There is a SO<sub>2</sub> content decrease tendency in the atmospheric column in Kazakhstan. The total sulfur dioxide content in the atmospheric column decreased by 38% during the period from 1980 to 2018.