

## Анализ выбросов диоксида серы по данным инструмента OMI (спутник AURA) для Норильской промышленной зоны

Д.В. Зуев, В.Б. Кашкин\*

Сибирский федеральный университет  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82

Поступила в редакцию 25.03.2013 г.

Производится оценка выбросов диоксида серы в атмосферу на основе спутниковых методов контроля в районе Норильской промышленной зоны за 2004–2012 гг. Используется база данных NASA по измерениям прибора Ozone Monitoring Instrument (спутник AURA). Наибольшая доля выбросов приходится на январь–май и ноябрь (90%), а оставшаяся часть – на июнь–октябрь. Максимальный объем выбросов составил 95 кт/мес в ноябре 2004 г.

Выполнен сравнительный анализ данных, получаемых по спутниковому методу, с данными наземной системы экологического мониторинга и метода мониторинга, использующего авиационный носитель. В первом случае данные различаются на 30–65%, а во втором – на 14%.

*Ключевые слова:* диоксид серы, спутник AURA, выбросы, Ozone Monitoring Instrument; sulfur dioxide, AURA satellite, emission, Ozone Monitoring Instrument.

### Введение

Экологическая обстановка на территории Норильской промышленной зоны по состоянию атмосферы формируется, главным образом, в результате производственной деятельности металлургических предприятий Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский Никель» – мощного многоотраслевого производственно-хозяйственного комплекса (добыча руд, обогащение, металлургия, вспомогательное производство: добыча нерудного сырья и полезных ископаемых, цементное производство, транспортная инфраструктура) [1]. В результате деятельности подразделений Заполярного филиала в атмосферный воздух поступает 57 вредных (загрязняющих) веществ, из них 8 – первого класса опасности (0,003% от суммарных валовых выбросов), 11 – второго класса опасности (3,37% от суммарных валовых выбросов), остальные загрязняющие вещества относятся к более низким классам опасности. По данным наземной системы мониторинга комбината отмечено превышение нормативного качества воздуха в жилых зонах по шести загрязняющим веществам: медь оксид, никель оксид, свинец и его неорганические соединения, селен диоксид, диоксид серы (SO<sub>2</sub>), пыль неорганическая с содержанием SiO<sub>2</sub> 70–20% [1, 2].

Основным загрязняющим веществом третьего класса опасности является диоксид серы, который

составляет примерно 96% [2] от всех выбросов Заполярного филиала. Никелевый завод, медный завод и Надеждинский металлургический завод вносят наибольший вклад в валовой выброс диоксида серы в атмосферный воздух.

Достижения в развитии инструментов мониторинга позволили расширить измерения от точечных (на наземной станции) до ежедневного глобального охвата всей атмосферы Земли. Информация, получаемая в результате спутниковых измерений SO<sub>2</sub> над территорией Норильской промышленной зоны, сосредоточена и накапливается в базе данных OMI (Ozone Monitoring Instrument) [3].

OMI регистрирует концентрацию диоксида серы на четырех высотах над уровнем моря: 0,9; 2,5; 7,5 и 17 км в единицах Добсона (е.Д., или DU). Фрагмент базы данных приведен в табл. 1, где SO<sub>2</sub>-0,9 км – концентрация SO<sub>2</sub> на высоте 0,9 км, е.Д. и т.д. (1 е.Д. равна 0,01 мм толщины осажденного слоя диоксида серы при 0 °С и атмосферном давлении 1013 ГПа, что составляет  $2,69 \cdot 10^{20}$  молекул диоксида серы на 1 м<sup>2</sup>). Типичное фоновое значение концентрации SO<sub>2</sub> в атмосфере составляет менее 1 е.Д. Погрешность оценки содержания диоксида серы прибором OMI равна ~ 1 е.Д.

OMI представляет собой направленный в надир спектрофотометр [4], предназначенный для регистрации солнечного излучения, отраженного и рассеянного атмосферой и поверхностью Земли в диапазоне от 264 до 504 нм со спектральным разрешением порядка 0,5 нм. Ширина съемки полосы поверхности при угле обзора камеры 114° составляет около

\* Дмитрий Владимирович Зуев (dmvzuev@yandex.ru); Валентин Борисович Кашкин (rtcvbk@rambler.ru).

Фрагмент базы данных ОМІ по выбросам диоксида серы на 01.10.2004 г.

Время с начала года UTC, с	Широта, град	Долгота, град	SO <sub>2</sub> -0,9 км, е.Д.	SO <sub>2</sub> -2,5 км, е.Д.	SO <sub>2</sub> -7,5 км, е.Д.	SO <sub>2</sub> -17 км, е.Д.
10468	68,98	88,93	4,281	0,813	0,18	0,073
10470	69,01	88,61	5,12	7,724	1,804	0,767
10472	69,05	88,28	2,674	6,496	1,377	0,57
10474	69,08	87,96	1,801	6,355	1,253	0,516

2600 км. В нормальном режиме работы ОМІ (предназначенном для съемки в глобальных масштабах) размер пикселя (при съемке в надир) составляет 13 × 24 км вдоль и поперек полосы съемки соответственно. Пространственное разрешение можно улучшить, уменьшив размер пикселя до 13 × 12 км.

Прибор ОМІ измеряет поток рассеянного «назад» ультрафиолетового солнечного излучения. Для оценки содержания диоксида серы используются два спектральных канала. В одном из них наблюдается сильное поглощение, а в другом — слабое. Однако в УФ-диапазоне кроме диоксида серы поглотителем электромагнитного излучения является озон. Поэтому одновременно определяется общее содержание озона. При оценке содержания SO<sub>2</sub> в атмосфере решается обратная задача. Алгоритм основан на использовании вертикальных модельных профилей озона и диоксида серы. Путем варьирования модели минимизируется средний квадрат разности между измеренными и модельными параметрами [5].

Кроме спутникового метода существуют наземный метод экологического мониторинга и метод мониторинга с использованием авиационного носителя. Достоинством спутникового метода является возможность ежедневного охвата большой территории. Однако инструмент ОМІ дает информацию об одном поллютанте и лишь один раз в сутки, кроме того, наблюдается зависимость от погодных условий. Отсутствуют данные для декабря и первой половины января, во время полярной ночи. В то же время наземный метод позволяет получать информацию о выбросах различных загрязняющих веществ несколько раз в день, но лишь в дискретных точках в приземном слое [1]. Наиболее информативным является мониторинг с использованием авиационного носителя. К сожалению, применение этого метода носит эпизодический характер [2, 8–11].

## Анализ выбросов диоксида серы за период с 2004 по 2012 г.

В ходе исследований произведен анализ выбросов диоксида серы предприятиями ОАО «ГМК «Норильский Никель». В табл. 2 сведены данные по зафиксированной раз в сутки массе выбросов SO<sub>2</sub> за период 2004–2012 гг. по данным ОМІ со второй половины января по ноябрь. В те дни, когда погодные условия (густая облачность) не позволяли произвести оценку массы SO<sub>2</sub>, были приняты значения, равные среднеарифметической массе выбросов в течение дня для текущего месяца. Данные табл. 2 отображены на рис. 1.

Максимальные объемы выбросов в 2005 г. зафиксированы в ноябре и с января по май (рис. 1). Среднемесячное значение массы SO<sub>2</sub> за это время ~ 32,68 кт. Пик выбросов приходится на январь и достигает 54,99 кт/мес. Наиболее «чистые» месяцы — июнь–октябрь, когда масса выбросов не превышала 5 кт/мес. Общий объем выбросов в 2005 г. зафиксирован в количестве 209,115 кт/год. Максимум выбросов в 2006 г., равный 75,303 кт/мес, приходится на ноябрь, а минимум 0,265 кт/мес — на июль. Значительное количество выбросов наблюдается также в январе–мае. За 2006 г. эмиссия диоксида серы зафиксирована в количестве 202,842 кт/год.

В 2007 г. по сравнению с 2006 г. масса выбросов диоксида серы скачкообразно увеличилась на 117,015 кт/год и достигла 319,857 кт/год, что связано, по-видимому, с увеличением объема производства [6] (рис. 2, табл. 3). Максимум выбросов зафиксирован с января по май, пик был в ноябре, когда масса SO<sub>2</sub> в атмосфере достигла 89,253 кт/мес. Минимальные значения выбросов диоксида серы были определены в летний период и в начале осени. Так, в августе выбросы составили 0,836 кт/мес.

Таблица 2

Зафиксированная масса выбросов диоксида серы (кт) по данным ОМІ

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Итого
2004	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,396	95,356	<b>96,752</b>
2005	54,992	37,222	7,125	37,102	34,028	4,983	2,889	0,187	1,449	3,556	25,582	<b>209,115</b>
2006	20,897	19,851	5,954	38,317	29,096	4,343	0,265	0,951	0,573	7,292	75,303	<b>202,842</b>
2007	80,822	61,943	16,555	8,603	45,22	6,791	1,763	0,836	1,851	6,22	89,253	<b>319,857</b>
2008	64,956	44,816	9,728	22,823	21,257	2,706	2,107	63,015	1,271	7,349	80,695	<b>320,723</b>
2009	35,862	17,530	3,930	14,207	50,929	6,680	1,084	0,383	0,425	2,585	27,293	<b>160,908</b>
2010	48,985	46,774	14,199	45,411	34,247	13,792	1,938	0,458	4,293	5,136	51,087	<b>266,320</b>
2011	81,0875	84,508	3,848	9,6	8,402	2,685	0,545	0,233	1,317	1,894	41,967	<b>236,087</b>
2012	45,459	70,578	17,935	15,829	31,35	2,180	2,561	1,099	1,475	21,542	55,949	<b>265,957</b>

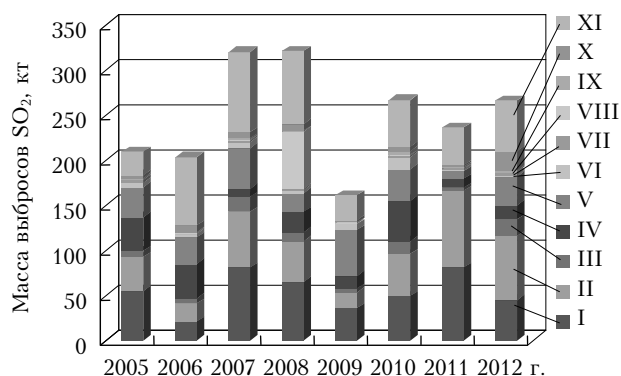


Рис. 1. Зафиксированная масса выбросов диоксида серы за 2005–2012 гг. по данным ОМІ

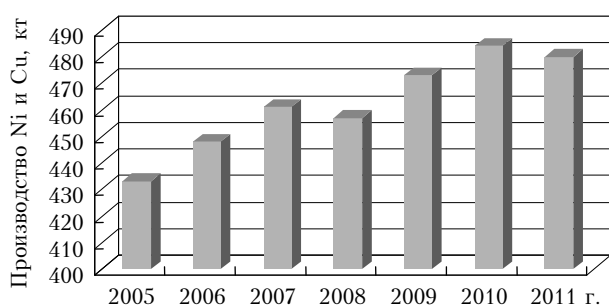


Рис. 2. Производство меди и никеля

Таблица 3  
Объемы производства меди и никеля (кт)  
в 2004–2011 гг.

Металл	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Медь	124	124	124	122	119	122	123	127
Никель	304	309	324	339	338	351	361	353
Итого	428	433	448	461	457	473	484	480

За весь период действия программы ОМІ наибольший объем выбросов был зафиксирован в 2008 г. и составил 320,723 кт/год. Максимум выбросов  $\text{SO}_2$  традиционно характерен для января–мая, с пиком выбросов в ноябре 80,695 кт/мес. Однако в 2008 г. высокий уровень выбросов зафиксирован и в августе, он составил 60,015 кт/мес. Минимальное значение массы  $\text{SO}_2$  выявлено в июле – 1,271 кт/мес. «Чистые» месяцы – июнь, июль, сентябрь, октябрь (масса выбросов не более 8 кт/мес).

2009 г. характеризуется наименьшим объемом выбросов – 160,908 кт/год. Пик эмиссии  $\text{SO}_2$  приходится на май и составляет 50,929 кт/мес. Минимальные выбросы определены в июне–октябре (не более 7 кт/мес). В 2010 г. происходит резкое увеличение объемов производства меди и никеля до 484 кт, что приводит к такому же скачкообразному увеличению выбросов диоксида серы до 266,32 кт/год. Наибольшая доля выбросов приходится на январь, февраль, апрель, май, ноябрь. За этот период выбросы в атмосферу составили ~85% от совокупного годового объема выбросов. Максимум наблюдается в ноябре – 51,087 кт/мес. Минимум выбросов зафиксирован в августе – 0,458 кт/мес.

В 2011 г. эмиссия диоксида серы уменьшилась на 30,234 кт/год, что вызвано замедлением производства никеля и меди на 4 кт/год, и составила 236,086 кт/год [3]. За январь, февраль и ноябрь были обнаружены выбросы диоксида серы в атмосферу в количестве 207,56 кт. С марта по октябрь уровень выбросов  $\text{SO}_2$  в атмосферу сохраняет постоянный характер и не превышает 10 кт/мес. Минимум выбросов выявлен в августе ~ 0,233 кт/мес. В 2012 г. экологическая обстановка схожа с 2010 г., общая масса диоксида серы составляет 265,957 кт/год. Наибольший объем выбросов зафиксирован в январе–мае, октябре, ноябре с максимумом в феврале – 70,578 кт/мес. Наиболее «чистые» месяцы июнь–сентябрь, объемы выбросов упали до уровня не выше 2,2 кт/мес.

Прослеживается связь между объемами производства и уровнем эмиссии диоксида серы. По нашей оценке, на 1 т произведенного комбинатом металла (никель, медь) в атмосферу выбрасывается примерно 350–710 кт диоксида серы. Анализ показывает, что наибольший вклад в концентрацию диоксида серы за 2005–2012 гг. зафиксирован в январе–мае и ноябре (рис. 3 и 4).

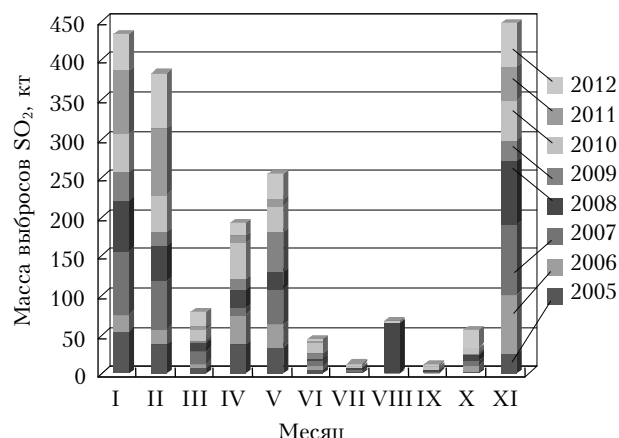


Рис. 3. Масса зафиксированных выбросов диоксида серы за 2005–2012 гг. ежемесячно

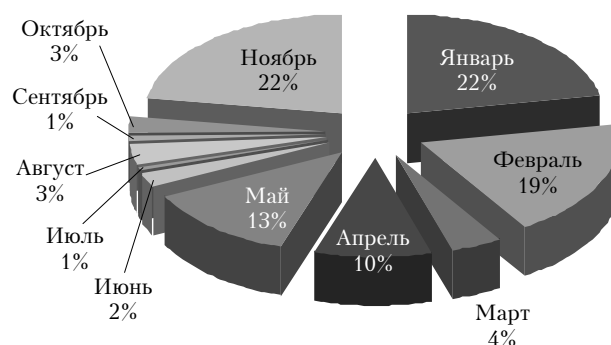


Рис. 4. Помесячный вклад в суммарный объем выбросов за 2005–2012 гг.

Доли вклада в годовую концентрацию  $\text{SO}_2$  в 2005–2012 гг. варьируются от 4% в марте до 22% в январе и ноябре. С июня по октябрь наблюдается

Масса выбросов диоксида серы в 2004–2012 гг.

Год	Масса выбросов SO <sub>2</sub> по данным наземных средств измерения, кт	Масса выбросов SO <sub>2</sub> по спутниковым данным ОМІ, кт
2004	1898,39	–
2005	–	836,460
2006	–	811,368
2007	–	1279,892
2008	1858,87	1282,892
2009	1850,96	643,632
2010	1848,89	1065,280
2011	–	944,346
2012	–	1063,830

заметное снижение концентрации диоксида серы (совокупная доля составляет 10% от общего объема выбросов). Это связано, по-видимому, с погодными условиями. Максимальные концентрации диоксида серы достигаются в безветренную ясную погоду, во время сильных ветров концентрации, как правило, не столь велики, но шлейф от выброса тянется на сотни километров, захватывая часть территории Северного Ледовитого океана и огромные пространства суши [7]. В периоды обильных снегопадов диоксид серы переносится на еще большие расстояния, особенно при сильных ветрах, поскольку SO<sub>2</sub> связывается замороженными кристаллами воды (снегом) и долго находится в приземном слое атмосферы [7].

Наблюдается резкое снижение концентрации диоксида серы в атмосферном воздухе в теплые месяцы (июнь–август), а затем ее повышение начиная с середины октября с достижением максимума во второй половине января – первой половине февраля. Такая динамика обусловлена тем, что максимальное количество дней с метелями выпадает на январь и февраль, это и приводит к высоким концентрациям SO<sub>2</sub>. Продолжительность метелей колеблется от нескольких часов до 2–4 сут, а иногда и больше, в результате вместе с осадками переносится огромное количество диоксида серы и продуктов его химических реакций, в итоге масштабы распространения загрязнения становятся катастрофическими. Зимний период ветрового режима начинается с момента установления снежного и ледового покровов и продолжается с ноября по март. В эти месяцы циркуляция воздушных масс контролируется мощным сибирским антициклоном.

Наземный контроль за состоянием атмосферного воздуха территории г. Норильска ведет Центр радиационно-экологического контроля Контрольно-аналитического управления (ЦРЭК КАУ) Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский Никель» [1]. С 2004 г. по настоящее время в Центре функционирует ведомственная передвижная экологическая лаборатория, оснащенная приборами для определения содержания диоксида серы. Наблюдения проводятся в приземном слое, дискретно через равные промежутки времени в 01, 07, 13 и 19 ч на трех постах, полученные за день данные суммируются.

Для сопоставления данных ОМІ с данными других методов экологического контроля [1] зафиксированная цифра, соответствующая массе диоксида серы по ОМІ за год, была умножена на 4, ввиду того, что ОМІ выполняет измерения один раз в сутки. Итоги наземного и космического мониторинга за 2004–2012 гг. приведены в табл. 4.

Полученные данные (ОМІ) были сопоставлены с результатами исследований, проведенных Институтом оптики атмосферы СО РАН в 2002 и 2004 гг. с помощью самолета-лаборатории Ан-30 «Оптика-Э» и наземного комплекса экологического контроля в Норильском промышленном районе [2, 8–11]. С точки зрения качества все три метода дают схожую картину по объему выбросов SO<sub>2</sub>. Однако по данным ежедневного спутникового мониторинга максимум выбросов приходится на зимние месяцы, а минимум –

на летние, тогда как по разовым измерениям ИОА СО РАН наблюдается обратная картина. Диапазон различий между спутниковым и наземным методами контроля соответствует промежутку от 30 до 65%. По-видимому, различия связаны с тем, что возможность измерения инструментом ОМІ напрямую зависит от наличия облачности, к тому же спутник проводит измерения один раз в сутки. С другой стороны, точность наземного метода также зависит от погодных условий, например от скорости и направления ветра.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что максимальный объем выбросов диоксида серы Заполярным филиалом ОАО «ГМК «Норильский Никель» по спутниковым измерениям был зафиксирован в 2007 и 2008 гг. и составлял ~ 1280 кт/год. Минимальный объем наблюдался в 2009 г. и соответствовал массе ~ 643 кт/год. Наибольшая годовая доля выбросов приходится на январь–май и ноябрь (90%), а остальные 10% – на июнь–октябрь.

Сравнительный анализ данных, получаемых по ОМІ, данных наземной системы мониторинга и результатов, полученных самолетом-лабораторией, показал, что с точки зрения качества три метода мониторинга дают схожую картину. Сравнение наземных и спутниковых данных выявило различие в объеме выбросов в диапазоне 30–65%.

Спутниковый метод контроля должен стать неотъемлемой частью системы экологического мониторинга ОАО «ГМК «Норильский Никель». Данные, получаемые от инструмента ОМІ, позволяют объективно оценить экологическую ситуацию в г. Норильске. Космический метод контроля дает возможность определить выбросы SO<sub>2</sub> на различных высотах за короткий промежуток времени и оценить направление дальнейшего перемещения выбросов.

Работа поддержана в рамках тематического плана СФУ, выполняемого по аналитической ведомственной целевой программе Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» (мероприятие 1).

1. *Официальный сайт* Федеральной службы по надзору в сфере природопользования: Действующая система мо-

- нитинга антропогенного воздействия на окружающую среду Заполярного филиала Открытого акционерного общества «Горно-металлургическая компания «Норильский никель» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gpn.gov.ru/node/5203>
2. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Пирогов В.А., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 1. Размеры и динамика колонки примесей // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 5. С. 441–447.
  3. *Официальный сайт NASA по глобальному мониторингу диоксида серы* [Электронный ресурс]. URL: <http://SO2.umbc.edu/omi>
  4. *Официальный сайт Королевского Метеорологического Института Нидерландов* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.knmi.nl>
  5. *Krotkov N.A., Carn S.A., Krueger P.K., Yang K.* Band residual difference algorithm for retrieval of SO<sub>2</sub> from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI) // Remote Sens. AURA. Special Issue. 2002. P. 1259–1266.
  6. *Официальный сайт открытого акционерного общества «Горно-металлургическая компания «Норильский никель»* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nornik.ru>
  7. *Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Уч. пособие. М.: Логос, 2001. 33 с.
  8. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 2. Баланс примесей в зоне Норильска // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 7. С. 622–631.
  9. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Краснов О.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 3. Распространение примесей // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 9. С. 798–804.
  10. *Аришинова В.Г., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 4. Вертикальная стратификация примесей // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 905–908.
  11. *Белан Б.Д., Задде Г.О., Ивлев Г.А., Краснов О.А., Пирогов В.А., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района.– Ч. 5. Примеси в приземном слое воздуха. Соответствие состава воздуха гигиеническим нормативам.– Рекомендации // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 2. С. 132–142.

***D.V. Zuev, V.B. Kashkin. Analysis of sulfur dioxide emissions above Norilsk industrial area using AURA satellite data.***

The problem of ecological conditions at Norilsk industrial area is discussed. The NASA database on OMI sensor (AURA satellite) is used for 2004–2012 years. The largest share of sulfur dioxide emissions were detected in January–May and November (90%). The maximum emission of 95 kt per month was observed in November 2004. A comparative analysis of data from the satellite with ground-based environmental monitoring and airborne monitoring data was carried out. The space and ground-based data differs by 30–65%, the space and airborne data – by 14%.