УДК 528.8:504.3.054(571.51)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Зуев Д.В., Кашкин В.Б., Симонов К.В.

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: dmvzuew@yandex.ru

Произведена оценка выбросов диоксида серы в приземном слое атмосферы (высота 900 м над уровнем моря) на основе спутниковых методов мониторинга за 2005–2017 гг. для северных территорий Красноярского края. Используется база данных NASA по измерениям прибора Ozone Monitoring Instrument (спутник AURA). Анализ массы выбросов диоксида серы показал ее постепенное увеличение от года к году. В 2005 г. масса выбросов диоксида серы составила 209,115 кт/год, а в 2017 г. отмечается увеличение в ~ 2,4 раза и масса составляет 497,297 кт/год. Снижение массы выбросов диоксида серы отмечается в 2009, 2011 и 2013 г. Максимальный объем выбросов диоксида серы за весь период наблюдения спектрофотометра OMI зафиксирован в 2015 г. – 679 кт/год. Минимальный объем выбросов диоксида серы был в 2009 г. и соответствовал массе ~160 кт/год. Произведена оценка вкладов в общую концентрацию диоксида серы за 2005–2017 гг. по месяцам. Наибольшая доля выбросов приходится на январь – май и ноябрь (89 %), а оставшаяся часть – на июнь – октябрь. Используется разработанная нами информационная система, позволяющая в автоматическом режиме оценивать выбросы диоксида серы в атмосферу. Произведено картографирование зон экологических рисков загрязнения выбросами диоксида серы для северных территорий Красноярского края. Определено, что на исследуемой территории в течение ~ 79 % дней сохраняется повышенный или неприемлемый уровень экологического риска для большинства видов растений и человека. В течение 11 % дней сохраняется приемлемый уровень риска либо данные для этих дней отсутствуют из-за неблагоприятных погодных условий (повышенная облачность). Произведено сравнение данных, получаемых от OMI, и данных наземной системы мониторинга. Оба метода отражают схожую картину, данные различаются от 3 до 46 %.

Ключевые слова: спутник, диоксид серы, космический мониторинг, концентрация, экологический риск

THE USING SATELLITE METHODS OF MONITORING FOR ESTIMATION OF ENVIRONMENTAL STATE OF NORTHERN TERRITORIES OF THE KRASNOYARSK REGION

Zuev D.V., Kashkin V.B., Simonov K.V.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: dmvzuew@yandex.ru

Evaluated emissions of sulfur dioxide in the atmospheric boundary layer (altitude of 900 m above sea level) based on satellite monitoring techniques for the 2005-2017 years for the Northern territories of Krasnoyarsk region. Uses a database of NASA's measurement instrument Ozone Monitoring Instrument (AURA satellite). Analysis of the mass emissions of sulfur dioxide showed a gradual increase from year to year. In 2005, the mass emission of sulphur dioxide amounted to 209,115 kt/year, and in 2017 there is an increase in ~ 2.4 times and is 497,297 kt/year. Weight reduction of sulfur dioxide emissions noted in 2009, 2011 and 2013. The maximum amount of sulfur dioxide emissions for the whole period of observation spectrophotometer OMI recorded in 2015 679 kt per year. The minimum amount of sulphur dioxide emissions was in 2009 and corresponded to a mass of ~160 kt/year. Assessed contributions to the overall concentration of sulfur dioxide in 2005-2017 gg. months. The largest share of emissions from January-may and November (89 %), and the remaining part of June-October. Used our developed information system allows to automatically evaluate the sulfur dioxide emissions into the atmosphere. Estimation of ecological risks of pollution by sulfur dioxide emissions for the Northern territory of the Krasnoyarsk region. Determined that the study area for ~ 79 % of days saved increased or unacceptable levels of ecological risk for most types of plants and humans. For 11 % days, maintained an acceptable level of risk or the data for those days absent due to adverse weather conditions (high cloud). A comparison of data derived from OMI and melon ground-based monitoring systems. Both methods reflect a similar pattern, the data vary from 3 to 46 %.

Keywords: satellite, sulfur dioxide, space monitoring, the concentration, the ecological risk, atmospheric pollution

Работа предприятий Норильской промышленной зоны приводит к техногенному загрязнению атмосферного воздуха, водоемов, к разрушению плодородного слоя земли и, соответственно, к уничтожению растительности. Доля выбросов диоксида серы предприятиями Норильской промышленной зоны составляет 25 % от российских промышленных выбросов [1]. Высокие концентрации диоксида серы в атмосфере очень быстро вызывают серьезные повреждения листьев, что приводит к хроническим повреждениям у растений. Выбросы SO_2 приводят к изменению состава почвы, что является одним из факторов, вызывающих повреждения лесных массивов вокруг предприятий северных территорий Красноярского края.

Для мониторинга выбросов диоксида серы в атмосферном воздухе используются: инструмент OMI (установленный на спутнике AURA), прибор OMPS (установ-

ленный на спутнике Suomi NPP) и спектрофотометр SCIAMACHY (установленный на спутнике ENVISAT). В данной работе мы используем данные, получаемые от инструмента OMI (Ozone Monitoring Instrument). OMI сменил на околоземной орбите своего предшественника – TOMS в 2004 г. (Total Ozone Mapping Spectrometer).

Дистанционные спутниковые методы контроля открывают новые возможности в изучении газового состава атмосферы и его динамики, мониторинга состояния окружающей среды, прогнозирования техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, связанных с поступлением загрязняющих веществ в атмосферу, а также упрощают изучение климатических изменений. Современные космические технологии мониторинга позволяют обеспечить ежедневный глобальный охват всей атмосферы Земли. Спектрофотометр Ozone Monitoring Instrument позволяет замерять выбросы диоксида серы от вулканов и эмиссии антропогенного происхождения. Вся информация концентрируется в базе данных [2]. OMI дает информацию о выбросах диоксида серы один раз в сутки и при этом существует зависимость от облачности. Данные для декабря и первой половины января в период полярной ночи отсутствуют, так как атмосфера в данном районе не освещена Солнцем.

На рис. 1 отображены территории постоянного мониторинга выбросов SO_2 [3], а также районы вулканической активности. Огромные территории Китайской Народной Республики, загрязненные выбросами диоксида серы, отмечены большим оранжевым прямоугольником. Небольшой оранжевый прямоугольник на севере Красноярского края охватывает определенную часть территории – Норильскую промышленную зону.

В работе используются данные по выбросам диоксида серы, полученные с открытого источника данных NASA (National Aeronautics and Space Administration) [3] по измерениям спектрометра OMI. Инструмент OMI определяет концентрацию выбросов SO_2 для четырёх высот над уровнем моря: 0,9 км, 2,5 км, 7,5 км и 17 км в е.Д. (единицах Добсона). В табл. 1 представлена часть базы данных OMI, где SO_2_0,9 км – концентрация диоксида серы на высоте 0,9 км, SO_2_2,5 км – концентрация диоксида серы на высоте 2,5 км, SO_2_7,5 км – концентрация диоксида серы на высоте 7,5 км, SO_2_17 км – концентрация диоксида серы на высоте 17 км. Одна е.Д. равна 0,01 мм толщины осажденного слоя диоксида серы при 0 °C и атмосферном давлении 1013 ГПа, что составляет $2{,}69 \times 10^{20}$ молекул диоксида серы на квадратный метр.

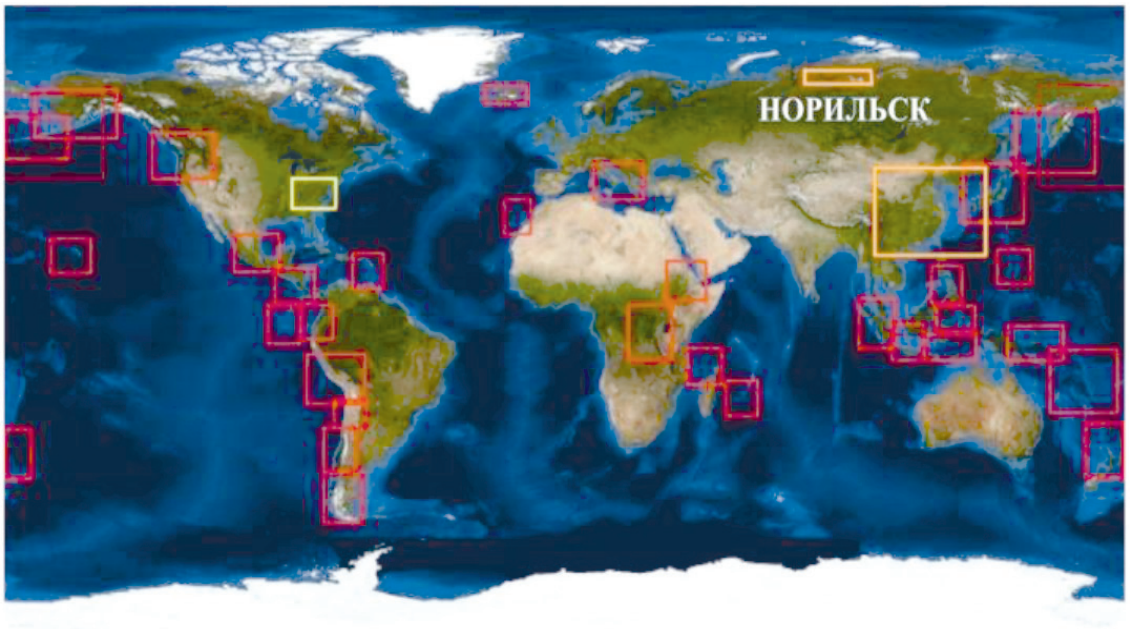

Рис. 1. Районы постоянного контроля выбросов диоксида серы инструментом OMI

Таблица 1

Фрагмент базы данных OMI по выбросам диоксида серы

Дата	Время с начала года UTC, с	Широта, градусы	Долгота, градусы	SO_2_0,9 км, е.Д.	SO_2_2,5 км, е.Д.	SO_2_7,5 км, е.Д.	SO_2_17 км, е.Д.
01.10.2004	10468	68,98	88,93	4,281	0,813	0,18	0,073
01.10.2004	10470	69,01	88,61	5,12	7,724	1,804	0,767
01.10.2004	10472	69,05	88,28	2,674	6,496	1,377	0,57
01.10.2004	10474	69,03	87,96	1,801	6,98	1,253	0,617
01.10.2004	10476	69,05	87,91	2,8	2,45	1,89	0,578
01.10.2004	10478	69,06	87,95	3,6	3,65	1,257	0,317
01.10.2004	10480	69,07	87,97	7,2	6,355	3,587	0,216

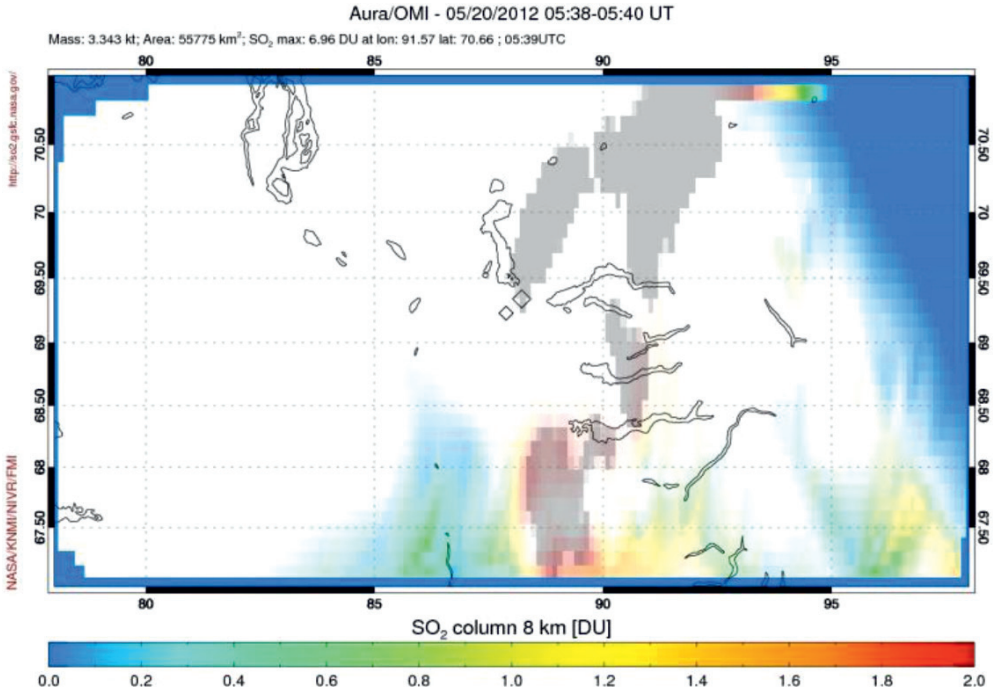

Рис. 2. Фрагмент графической базы данных OMI для северных территорий Красноярского края по выбросам SO_2

Также существует графическая база данных OMI по выбросам диоксида серы для Норильской промышленной зоны (рис. 2), где цветом обозначено содержание SO_2. Она описывает период с 2004 по 2017 гг. и включает данные о массе выбросов диоксида серы, площади распространения, максимальных значениях концентрации SO_2 с привязкой по координатам, время проведения замера.

Спектрометр OMI предназначен для регистрации солнечного излучения в диапазоне от 270 до 500 нм (спектральное разрешение 0,5 нм). В обычном режиме работы инструмента OMI, при съемке в глобальном масштабе, размер пикселя составляет 13 км на 24 км соответственно вдоль и поперек полосы съемки. При обзоре камеры в 114° ширина съемки полосы инструмента OMI составляет 2600 км. В алгоритме оценки концентрации SO_2 используются два спектральных канала: с сильным и слабым поглощениями. При этом поглотителем солнечного излучения в УФ диапазоне является и озон, помимо SO_2. Поэтому необходимо определить и содержание озона. Решается обратная задача для оценки общего содержания диоксида серы. В основе алгоритма лежит использование модельных профилей SO_2 и озона. Далее, варьированием модели минимизируется средний квадрат разности между модельными и измеренными параметрами [2]. Погрешность оценки содержания диоксида серы в атмосфере прибором OMI составляет ~ 0,3 е.Д. [4].

Осуществлен анализ выбросов SO_2 предприятий северных территорий Красноярского края по массе за 2005–2017 гг. [3, 5]. Данные получены с февраля по ноябрь, кроме декабря и половины января в период полярной ночи. Также отсутствуют данные в дни плохих погодных условий. Для них взяты значения, соответствующие среднеарифметической массе выбросов в течение дня, характерные для данного месяца.

На рис. 3 представлен график выбросов диоксида серы по массе за 2005–2017 гг., который отражает постепенное увеличение объемов выбросов SO_2 от года к году. Так, в 2005 г. масса выбросов диоксида серы составила 209,115 кт/год, а в 2017 г. отмечается увеличение в ~ 2,4 раза и составляет 497,297 кт/год. Максимальный объем выбросов диоксида серы за весь период наблюдения спектрофотометра OMI зафиксирован в 2015 г. – 679 кт/год, при этом рекордные объемы выбросов зафиксированы – в мае 313 кт/месяц и в апреле 278 кт/месяц. Минимальный объем выбросов диоксида серы был зарегистрирован в 2009 г. и составил 160,908 кт/год.

В ходе исследования выявлено, что максимальный вклад в объем выбросов SO_2 за период с 2005 по 2017 гг. приходится на месяцы с февраля по май и ноябрь, совокупная доля составляет 89% от годового объема выбросов диоксида серы (рис. 4). Снижение выбросов SO_2 наблюдается с июня по октябрь, что не превышает 11% от всего объема выбросов. Это, в большей вероятности, объясняется изменением погодных условий. Существует корреляционная связь между объемами выбросов SO_2 и объемами производства на предприятиях. Определено, что на одну тонну произведенной продукции в атмосферу выбрасывается от 350 до 710 кг диоксида серы.

Максимум концентрации SO_2 характерен для ясной погоды. В периоды сильных ветров концентрация диоксида серы невысокая, но при этом большая площадь территории поражения [6]. Во время сильных снегопадов SO_2 перемещается на большие расстояния, так как диоксид серы взаимодействует с частицами воды и долгое время не выпадает в осадок, находясь в приземном слое атмосферы [6].

Данные OMI сопоставлены с данными наземной системы мониторинга Центра радиационно-экологического контрольно-аналитического управления (ЦРЭК КАУ) Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский Никель» (табл. 2) [7]. ЦРЭК КАУ проводит наблюдения в приземном слое атмосферы, через равные интервалы времени в 01, 07, 13 и 19 ч на трех постах, полученные данные суммируются. Для сравнения данных инструмента OMI с данными наземной системы мониторинга, зафиксированная цифра, соответствующая массе SO_2 по OMI умножена на 4, так как спектрометр OMI осуществляет измерения один раз за сутки [5]. Разница между данными наземной и спутниковой системы контроля лежит в интервале от 3% до 46%. Это, по-видимому, обусловлено тем, что точность измерения OMI зависит от облачности и спутник проводит измерения один раз в сутки. При этом точность измерения наземной системы мониторинга зависит от погодных условий, скорости и направления ветра.

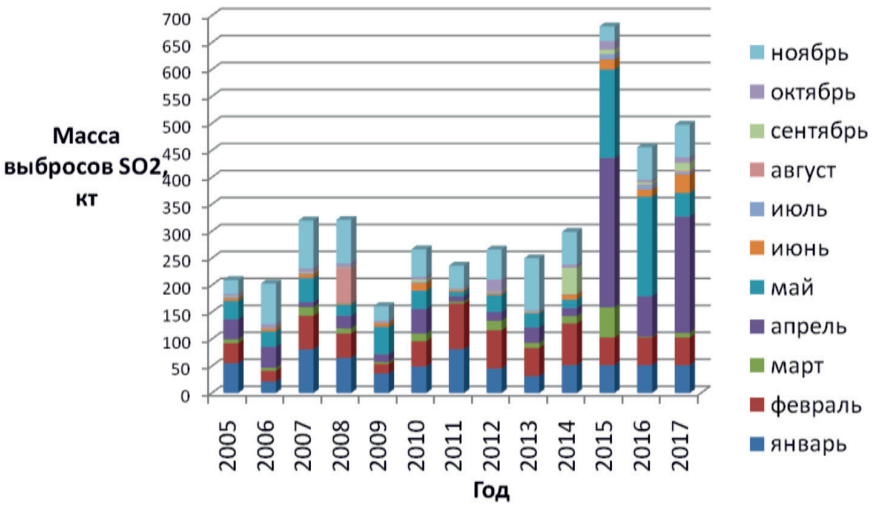

Рис. 3. Масса выбросов диоксида серы по данным инструмента OMI за 2005–2017 гг. для северных территорий Красноярского края

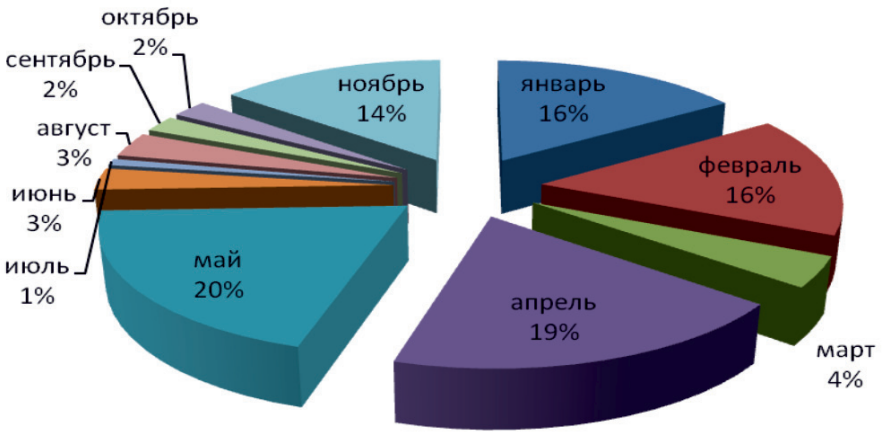

Рис. 4. Помесячный вклад в суммарный объем выбросов за 2005–2017 гг. для северных территорий Красноярского края

Таблица 2

Масса выбросов диоксида серы наземной и спутниковой системы мониторинга

Год	Масса выбросов диоксида серы по данным OMI, кт	Масса выбросов диоксида серы по данным ЦРЭК КАУ, т
2013	998	1881
2014	1194	1797
2015	2717	2010
2016	1821	1880

В работе произведена оценка и картографирование зон экологических рисков воздействия выбросов диоксида серы на окружающую среду: на хвойный и мелколиственный лес, на травянистую растительность. Оценка и картографирование зон экологического риска осуществляется по методике, предложенной Ю.М. Полищук (Институт химии нефти СОРАН г. Томск) и О.С. Токаревой (Томский политехнический университет) [8–10].

Наличие в атмосфере SO_2 создает высокую степень экологического риска. Мы рассматриваем три степени экологического риска: приемлемый, повышенный и неприемлемый. В соответствии с этим исследуемую территорию разделяем на зоны с приемлемым, повышенным и неприемлемым уровнем риска. Для этого определяем уровни концентраций диоксида серы, определяющие разные уровни риска.

Для определения уровня загрязнения выбросами диоксида серы атмосферы в долях ПДК (предельно допустимая концентрация) использованы данные и методические материалы [6]. Среднегодовые концентрации диоксида серы в атмосфере определяются на основе ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных мест». Для определения степени загрязнения атмосферы учитывается класс опасности вещества, его масса, кратность превышения среднегодового значения ПДК, допустимая повторяемость концентраций заданного уровня. Для определения среднегодового значения ПДК используется формула

$$ПДКс/г = a* ПДКс/с,$$

где ПДКс/с – среднесуточное значение ПДК, а – коэффициент, значение которого соответствует определенному классу опасности вещества и лежит в интервале от 0,1 до 1. После проведения расчетов получаем значение повышенного уровня риска, соответствующего границам от 1 до 1,25 е.Д. Приемлемый уровень риска для выбросов диоксида серы соответствует диапазону от 0 до 1 е.Д. Неприемлемый уровень экологического риска возникает при значении концентрации диоксида серы выше 1,25 е.Д.

Для построения карт экологических рисков используются следующие значения коэффициентов чувствительности: травянистая растительность – 1; мелколиственный лес – 0,75; хвойный лес – 0,5. Коэффициент чув-

ствительности определяется в соответствии с рекомендациями сотрудников Научно-исследовательского института охраны атмосферного воздуха [8]. Таким образом, чем выше значения коэффициента чувствительности, тем ниже концентрации диоксида серы, отрицательно влияющие на определенный вид растительности. В табл. 3 рассчитаны для каждой группы растительности зоны с определенным уровнем загрязнения атмосферы выбросами диоксида серы, соответствующие разным зонам экологического риска [9, 10].

На рис. 5 представлен результат картографирования зон экологических рисков для северных территорий Красноярского края 18 апреля 2005 г. Из него мы видим значительное загрязнение атмосферного воздуха выбросами диоксида серы для исследуемой территории, создающие повышенные риски воздействия как на организм человека, так и на растительный мир. Данный результат картографирования зон рисков может служить сигналом для предприятий северных территорий Красноярского края об уменьшении производственных мощностей, что нормализует экологическую обстановку.

Заключение

В работе проведен анализ выбросов SO_2 для северных территорий Красноярского края по массе с 2005 по 2017 г. Выявлены года с максимальным (2015 г. и 2017 г.) и минимальным значением выбросов диоксида серы (2009 г.). Наибольший вклад в общий объем выбросов диоксида серы в течение года приходится на период с февраля по май и ноябрь (89%), наименьший – на июнь – октябрь (11%). Построена карта зон экологических рисков загрязнения атмосферы выбросами диоксида серы для исследуемых территорий.

Таблица 3

Границы уровней загрязнения атмосферы

Уровень экологического риска	Уровень загрязнения атмосферы, е.Д.		
	Хвойный лес	Мелколиственный лес	Травянистая растительность
Неприемлемый	>0,625	>0,94	>1,25
Повышенный	0,625…0,5	0,94…0,75	1,25…1
Приемлемый	<0,5	<0,75	<1

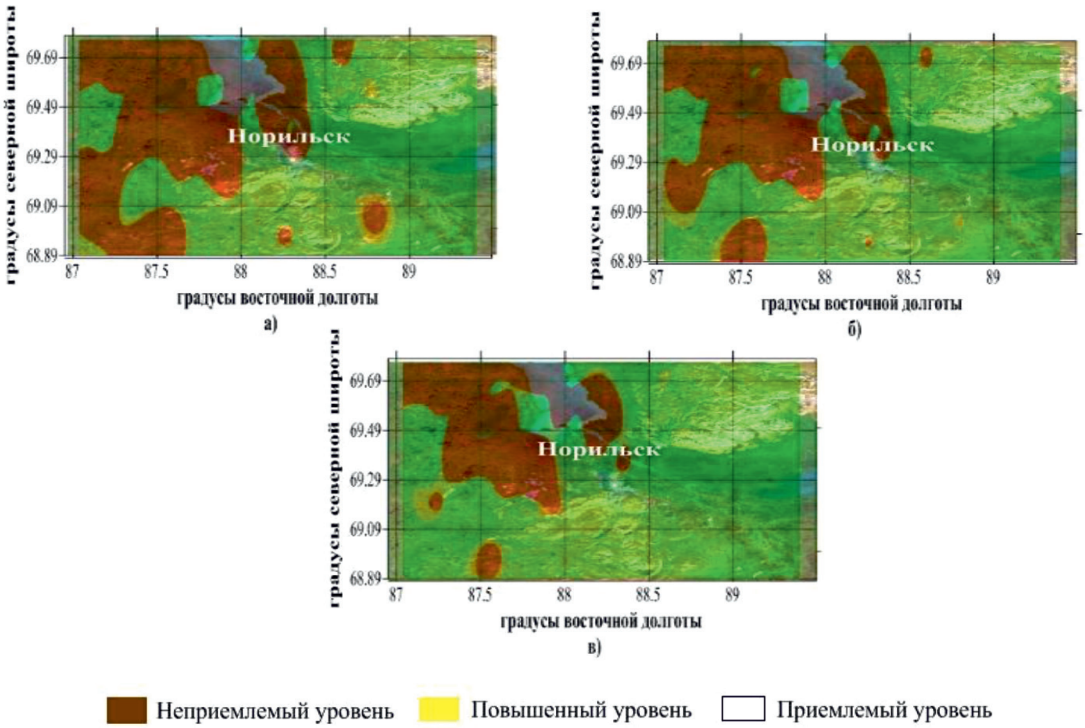

Рис. 5. Картографирование зон экологического риска для северных территорий Красноярского края 18 апреля 2005 г., а – для хвойного леса; б – для мелколиственного леса; в – для травянистой растительности

Спутниковый метод мониторинга позволяет осуществлять экологический контроль атмосферы, при этом являясь одним из наиболее экономически эффективных методов наблюдения. Этот метод мониторинга на основе данных инструмента OMI позволяет получать информацию о выбросах диоксида серы на различных высотах, а также дает возможность определить дальнейшее направление распространения выбросов. Спутниковый метод мониторинга является независимым и объективным источником информации, позволяющим делать выводы об изменении состава атмосферы для северных территорий Красноярского края.

Список литературы

1. Проект Государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды в 2016 году [Электронный ресурс]. – URL: http://www.mnr.gov.ru/online/detail.php?ID=343440 (дата обращения: 12.12.17).

2. Krotkov N.A., Carn S.A., Krueger P.K., Yang K. Band residual difference algorithm for retrieval of SO_2 from the Aura Ozone Monitoring Instrument(OMI) // Remote Sensing. AURA Special Issue. – 2002. – P. 1259–1266. URL: https://espo.nasa.gov/attrex/content/Band_Residual_Difference_Algorithm_for_Retrieval_of_SO2_From_the_Aura_Ozone_Monitoring (дата обращения: 12.12.17).

3. Официальный сайт NASA по глобальному мониторингу диоксида серы. [Электронный ресурс]. – URL: https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMSO2/aura_omi_l2ovp_omso2_v1.3.0_norilsk_999.txt (дата обращения: 12.12.17).

4. Elena S., Simon A., Carn S.A., Krotkov N.A., George H., Yang K., Krueger A. Validation of ozone monitoring instrument SO2 measurements in the Okmok volcanic cloud over Pullman, WA, July 2008 // Journal of geophysical research. – 2010. – Vol. 115. – P. 1–14.

5. Зуев Д.В., Кашкин В.Б. Анализ выбросов диоксида серы по данным инструмента OMI (спутник AURA) для Норильской промышленной зоны // Оптика атмосферы и океана. 2013. – № 9. – С. 793–797. URL: http://sibran.ru/upload/iblock/95d/95dfeb7fd0be759202e0a50d54906039.pdf (дата обращения: 12.12.17).

6. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений // Учебное пособие. – М.: Логос, 2001. – С. 73.

7. Годовой отчет ПАО «ГМК «Норильский Никель» за 2016 год. [Электронный ресурс]. – URL: https://ar2016.nornik.ru/pdf/ar/ru/ru_annual_report_pages.pdf (дата обращения: 12.12.17).

8. Коплан-Дикс В.А., Алехова М.В. К вопросу разработки экологических нормативов качества атмосферного воздуха // Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха. 2009 [Электронный ресурс]. – URL: https://distant.msu.ru/mod/resource/view.php?id=14264 (дата обращения: 12.12.17).

9. Полищук Ю.М., Токарева О.С. Методические вопросы картографирования зон экологического риска воздействия нефтедобычи на растительный покров // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – № 1. – С. 166–169.

10. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Методика Министерства природных ресурсов РФ от 30 ноября 1992 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://lawrussia.ru/bigtexts/law_4008/index.htm (дата обращения: 03.12.17).

References

1. Proekt Gosudarstvennogo doklada o sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy v 2016 godu [Jelektronnyj resurs]. URL: http://www.mnr.gov.ru/online/detail.php?ID=343440 (data obrashhenija: 12.12.17).

2. Krotkov N.A., Carn S.A., Krueger P.K., Yang K. Band residual difference algorithm for retrieval of SO2 from the Aura Ozone Monitoring Instrument(OMI) // Remote Sensing. AURA Special Issue. 2002. pp. 1259–1266. URL: https://espo.nasa.gov/attrex/content/Band_Residual_Difference_Algorithm_for_Retrieval_of_SO2_From_the_Aura_Ozone_Monitoring (data obrashhenija: 12.12.17).

3. Oficialnyj sajt NASA po globalnomu monitoringu dioksida sery. [Jelektronnyj resurs]. URL: https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMSO2/aura_omi_l2ovp_omso2_v1.3.0_norilsk_999.txt (data obrashhenija: 12.12.17).

4. Elena S., Simon A., Carn S.A., Krotkov N.A., George H., Yang K., Krueger A. Validation of ozone monitoring instrument SO2 measurements in the Okmok volcanic cloud over Pullman, WA, July 2008 // Journal of geophysical research. 2010. Vol. 115. pp. 1–14.

5. Zuev D.V., Kashkin V.B. Analiz vybrosov dioksida sery po dannym instrumenta OMI (sputnik AURA) dlja Norilskoj promyshlennoj zony // Optika atmosfery i okeana. 2013. no. 9. pp. 793–797. URL: http://sibran.ru/upload/iblock/95d/95dfeb7fd0be759202e0a50d54906039.pdf (data obrashhenija: 12.12.17).

6. Kashkin V.B., Suhinin A.I. Distancionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij // Uchebnoe posobie. M.: Logos, 2001. pp. 73.

7. Godovoj otchet PAO «GMK «Norilskij Nikel» za 2016 god. [Jelektronnyj resurs]. URL: https://ar2016.nornik.ru/pdf/ar/ru/ru_annual_report_pages.pdf (data obrashhenija: 12.12.17).

8. Koplan-Diks V.A., Alehova M.V. K voprosu razrabotki jekologicheskih normativov kachestva atmosfernogo vozduha // Nauchno-issledovatelskij institut ohrany atmosfernogo vozduha. 2009 [Jelektronnyj resurs]. URL: https://distant.msu.ru/mod/resource/view.php?id=14264 (data obrashhenija: 12.12.17).

9. Polishhuk Ju.M., Tokareva O.S. Metodicheskie voprosy kartografirovanija zon jekologicheskogo riska vozdejstvija neftedobychi na rastitelnyj pokrov // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2011. no. 1. pp. 166–169.

10. Kriterii ocenki jekologicheskoj obstanovki territorij dlja vyjavlenija zon chrezvychajnoj jekologicheskoj situacii i zon jekologicheskogo bedstvija. Metodika Ministerstva prirodnyh resursov RF ot 30 nojabrja 1992 g. [Jelektronnyj resurs]. URL: https://lawrussia.ru/bigtexts/law_4008/index.htm (data obrashhenija: 03.12.17).