

Оценка возможности использования профиля озона высокого разрешения по данным прибора GOME-2 для оценки концентраций приземного озона

А.М. Трифонова-Яковлева^{1,2}, С.А. Громов¹, С.С. Громов^{1,3}, Т.В. Ходжер⁴, В.Л. Потемкин⁴,
В.А. Оболкин⁴

¹ *Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
Москва, 107258, Россия*

E-mails: yakovleva.eanet@gmail.com, gromov.igce@gmail.com

² *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*

³ *Институт Макса Планка по химии, Майнц, Германия*

⁴ *Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*

В статье проведена оценка концентрации приземного озона в Байкальском регионе по данным профиля озона высокого разрешения на основе измерений прибора GOME-2, установленного на спутнике MetOp-A. Вертикальный профиль озона предоставлен европейским спутниковым агентством EUMETSAT. Для проверки реалистичности значений приповерхностной концентрации озона, полученных на основе спутниковых данных, было проведено сравнение с наземными наблюдениями. Показано, что осредненные значения наземных измерений и спутниковых оценок хорошо согласуются между собой для периода осреднения от тридцати дней. Также доказывается, что спутниковые оценки пригодны для описания регионального загрязнения, правдоподобно отражают как годовой ход, так и пространственное изменение концентрации, однако существуют ограничения на использование этих оценок для описания мгновенной концентрации, а также непосредственно городского загрязнения. На основе спутникового продукта оценено пространственное среднесезонное и среднегодовое содержание озона в Байкальском регионе в приповерхностном слое атмосферы. Для всего региона наблюдаются выраженные сезонные изменения с максимумом в весенние и минимумом в осенние месяцы. Концентрация озона в чистых высокогорных районах оказалась в целом выше, чем в промышленных районах долин рек Селенги и Ангары.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, дистанционное зондирование, региональное загрязнение, озон, EANET

Одобрена к печати: 25.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-239-247

Введение

Озон по параметрам острой токсичности относится к первому классу опасности, является сильнейшим окислителем. В приземном слое он непосредственно взаимодействует с живыми организмами, обнаруживая токсические свойства. Мониторинг приземного озона входит в программы многих международных сетей, в частности GAW (Global Atmospheric Watch), EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia). На территории России, где сеть мониторинга загрязнения воздуха является крайне разреженной, представляется целесообразным использовать данные спутникового зондирования. Таким образом, может быть получена информация о пространственном распределении концентраций или общего содержания загрязняющих веществ в воздухе. В настоящей работе предпринята попытка оценить среднесезонные концентрации приземного озона на основе спутникового продукта профиля озона в атмосфере.

Рассматривалась область, включающая в себя Байкальский регион, где располагается несколько станций наземных измерений концентраций озона в приземном слое. Регулярный

мониторинг концентраций озона в Байкальском регионе проводится Лимнологическим институтом СО РАН (Иркутск) на станциях городского, регионального и фонового загрязнения (Потемкин, Потемкина, Гусева, 2015; Хуриганова и др., 2015), Институтом физического материаловедения СО РАН (Жамсуева и др., 2014). На основе сравнения спутниковых и наземных наблюдений была рассмотрена возможность использования профиля озона высокого разрешения для расчета приземных концентраций озона.

Данные измерений

Спутниковые измерения

В настоящей работе для оценки приземных концентраций озона в Байкальском регионе использовались данные прибора GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2), установленного на полярно-орбитальном спутнике MetOp-A (Meteorological Operational Satellite Program of Europe). Европейское спутниковое агентство EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) предоставляет различные спутниковые продукты, полученные на основе данных прибора GOME-2, в том числе профиль озона высокого разрешения для 40 слоев по вертикали до верхней границы около 0,001 гПа, т.е. до высоты более 80 км.

Спутник MetOp-A находится на солнечно-синхронной орбите и проходит над каждой точкой Земли примерно в один и тот же интервал местного солнечного времени. Для Байкальского региона около 10:30 до 12:30 по местному времени.

Пространственное разрешение результатов данного спутникового продукта составляет 40×40 км. Для каждого пиксела указано время измерения, а также различные флаги качества измерения и процесса восстановления концентраций по спутниковым данным.

Также в пакет информации спутникового продукта включены оцененные ошибки восстановления концентраций. Относительные ошибки для рассмотренных данных составляют от ~10 до ~50%. Более детальное описание можно найти в работе (Tuinder, 2015).

Для сравнения с наземными измерениями были использованы значения концентрации из профиля озона для слоя, ближайшего к поверхности земли. Высота его верхней границы для рассматриваемого региона — до 2 км.

Наземные измерения

Для проверки реалистичности спутниковых оценок у поверхности земли было проведено сравнение их с результатами наземных измерений, осуществляемых на станциях сети EANET в Байкальском регионе с помощью автоматического газоанализатора и пассивного пробоотборника.

Сеть EANET — это мониторинг кислотных выпадений в Восточной Азии на территории 13 стран, включая Россию. На *рис. 1* представлены станции EANET в России. В настоящей работе использовались только данные со станций, расположенных в Байкальском регионе.

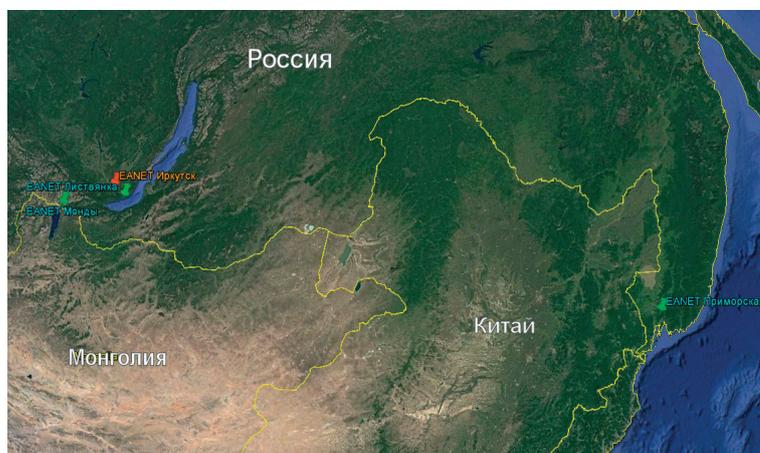


Рис. 1. Станции EANET в России

Фоновая станция Монды расположена в Тункинском районе Забайкальского края республики Бурятия, на высоте около 2000 м над уровнем моря. Станция Листвянка относится к категории региональных станций. Находится примерно в 40 км к юго-востоку от Иркутска, на берегу озера Байкал, в 5 км к северу от истока реки Ангары. Станция расположена на вершине холма, поросшего лесом, за границей небольшого поселка Листвянка. В самом поселке отсутствуют промышленные источники загрязнения, однако по результатам анализа непрерывных измерений выявлены эпизоды, когда станция была подвержена кратковременному влиянию струйных переносов выбросов ТЭЦ в Ангарске и Иркутске (Оболкин и др., 2014). На городской станции в Иркутске регулярный мониторинг осуществляется на территории Лимнологического института с помощью пассивного пробоотборника. Время экспозиции пробоотборника составляет от одной до четырех недель, таким образом, полученные результаты фактически являются физически осредненной концентрацией за период экспозиции.

Дополнительно, для сравнения с концентрацией озона в городских условиях, были использованы данные по измерениям в городе Улан-Удэ (Жамсуева и др., 2014).

Сравнение спутниковых оценок и наземных измерений

Для региональных станций

Для сравнения уровней концентрации озона в приземном слое использовался профиль озона высокого разрешения на основе спутниковых данных и измерения наземных станций с мая 2013 по декабрь 2015 г. включительно. Из профиля озона выбирались пиксели,

покрывающие участки, на которых размещены рассматриваемые станции наземных наблюдений. Из 40 слоев по вертикали выбирался слой, наиболее близкий к поверхности. Спутниковые оценки доступны для интервала около полудня по местному времени ежедневно. Осредненные за 30 мин значения со станций EANET выбирались для интервала наиболее близкого к моменту прохождения спутника над ними. Разница во времени спутниковых оценок и измерений автоматического газоанализатора для станций Монды и Листвянка не превышает 15 мин. Результаты сравнения приведены на *рис. 2*.

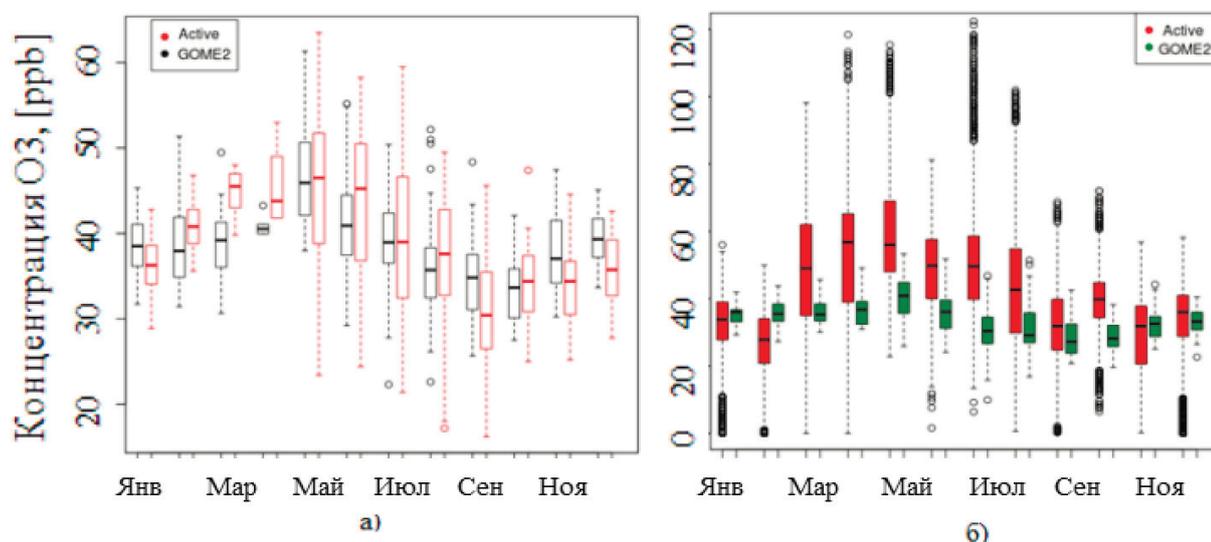


Рис. 2. Сравнение годового хода озона на станции: а) — Монды по наземным (красные диаграммы) и спутниковым (черные диаграммы) данным; б) — Листвянка по наземным (красные диаграммы) и спутниковым (зеленые диаграммы) данным

Сопоставление мгновенных значений концентрации по результатам станции Монды показало, что оценки содержания озона не очень хорошо согласуются между собой: коэффициент корреляции составил около 0,15.

В спутниковый продукт включены оценки ошибок восстановления концентрации озона для каждого из слоев. Эти значения ошибок в приземном слое для станции Монды оказываются иногда в два раза меньше, чем разность мгновенных концентраций озона по спутниковым и наземным данным. Следовательно, даже с учетом приводимых ошибок использование спутниковых оценок мгновенных концентраций озона на станции Монды не является целесообразным.

Однако распределение разностей мгновенных значений автоматического газоанализатора и спутниковых измерений близко к нормальному, причем максимальная частота находится около нуля. При осреднении данных корреляция увеличивается и достигает значения 0,7 для периода осреднения 30 дней. Таким образом, средние значения спутниковых оценок оказываются близки к результатам наземных измерений, а среднемесячные значения, рассчитанные по ним, пригодны для оценки средних уровней концентраций у поверхности.

При сравнении непосредственно распределений спутниковых оценок и полных данных автоматического газоанализатора на станции Монды (*рис. 2а*) видно, что оба типа измерений демонстрируют схожий внутригодовой ход с максимумом в мае и минимумом в сентябре-

октябре. Межквантильные интервалы перекрываются, и средние значения очень близки для большинства месяцев, за исключением начала весны.

Для марта и апреля среднемесячные концентрации из нижнего слоя профиля озона оказываются практически равными, в то время как средние значения по наземным измерениям сильно отличаются. Объяснением этого расхождения может быть алгоритм оценки распределения озона с высотой. В случае, когда в атмосфере наблюдается значительный вертикальный градиент концентраций, как в весенние месяцы для средних широт (Белан, Толмачев, Фофонов, 2010), используемый для расчета априорный профиль может не соответствовать реальности (Tuinder, 2015). Это, видимо, и имеет место для марта и апреля, и следует учитывать, что спутниковые измерения в рассматриваемом регионе для этих месяцев не вполне соответствуют наземным и могут являться заниженными.

Аналогичное сравнение было проведено по результатам наблюдений на станции Листвянка. Сравнение мгновенных значений не показало хорошего согласования данных, коэффициент корреляции также меньше 0,2. При осреднении данных коэффициент корреляции повышается до 0,7 для периода осреднения 30 дней. На *рис. 2б* приведен годовой ход концентраций озона по спутниковым и наземным измерениям на станции Листвянка.

Видно, что изменения происходят синхронно и максимум годового хода достигается в мае, а минимум — осенью. Однако для станции Листвянка соответствие между данными наземных измерений и спутниковыми несколько хуже, чем на станции Монды. Это обусловлено несколькими причинами.

Во-первых, используемая для осреднения спутниковых оценок область вокруг станции представляет собой приблизительно круг радиусом 40 км, поскольку используются ячейки размером примерно $40 \times 40 \text{ км}^2$. В отличие от станции Монды, территория вокруг станции Листвянка является сильно неоднородной. Таким образом, получаемые по данным GOME-2 значения концентрации являются средними для достаточно большой области, тогда как измерения на станции (около 3 м над поверхностью) характерны для более узких границ территории с большей однородностью.

Во-вторых, наибольшие различия в средних характеристиках по наземным и спутниковым измерениям ожидаются, когда локальные условия усиливают образование или разрушение озона. Поскольку станция окружена лесом, в летний период образование озона может быть усилено реакциями с выделяемыми лесом изопренами, максимум эмиссии которых приходится на теплые и солнечные дни. Также территория Листвянки иногда подвержена влиянию загрязненного воздуха, переносимого от Ангарска и Иркутска. В таких условиях могут формироваться более высокие концентрации приземного озона вблизи станции (Sillman, 1999).

Весной в рядах, рассчитанных по спутниковым данным значений концентрации для области, покрывающей Листвянку, обнаружено, как и в случае станции Монды, отсутствие выраженного сезонного роста содержания озона и заниженные по сравнению с наземными измерениями значения. Это может быть вызвано причинами, описанными выше для весенних измерений на станции Монды.

Согласно наблюдениям в приземном слое воздуха (Хуриганова и др., 2015), сезонный ход содержания приземного озона в Иркутске имеет максимум в весенние месяцы и минимум в осенние. При этом концентрация на городской станции Иркутска в 1,5–2 раза ниже, чем на региональной и фоновой станциях Листвянка и Монды. Однако средняя концентрация над городом, полученная по спутниковым оценкам, примерно равна средней концентрации над фоновыми районами, т.е. реальная ситуация в приземном слое атмосферы отражается плохо.

Несоответствие также имеет место и для приземной концентрации озона в Улан-Удэ (Жамсуева и др., 2014). Средняя концентрация, согласно спутниковым измерениям, завышена, за исключением весенних месяцев, а годовой ход над регионом, где находится Улан-Удэ, имеет максимум весной, а минимум осенью, тогда как годовой ход, согласно наземным данным, имеет минимум в зимние месяцы.

Оценка приземной концентрации озона в Байкальском регионе по данным GOME-2

Для расчета уровней концентрации озона в приземном слое использовались спутниковые оценки с мая 2013 по декабрь 2015 г. включительно для Байкальского региона. Координаты левого нижнего угла области (юго-западного) — 49° с.ш., 100° в.д., правого верхнего (северо-восточного) — 57° с.ш., 114° в.д. Для оценки полей концентрации внутри домена выбирались точки по широте и долготе с шагом в $0,5^\circ$. Далее вычислялось среднегодовое и среднесезонные значения из всего набора в пикселях, накрывающих данную точку.

По результатам обработки данных определено, что для всей территории существует годовой ход озона с максимумом весной и минимумом осенью. При этом следует иметь в виду, что значения весенних концентраций по спутниковым оценкам могут быть занижены, и концентрация озона в приземном слое в эти месяцы несколько выше.

На *рис. 3* и *4* приведены поля среднегодовых и среднесезонных уровней концентрации озона в нижних слоях тропосферы над регионом озера Байкал. Звездочками обозначены станции EANET, где проводятся наземные измерения. Результаты на рисунках показывают, что спутниковые измерения отражают пространственные различия. Например, в высокогорных чистых районах содержание озона в воздухе в целом выше, чем в промышленных районах долин реки Селенги и Ангары. И хотя разница средних значений не очень большая, статистическое сравнение с помощью *t*-теста полных временных рядов для контрольных точек, расположенных в промышленных и удаленных районах, показало, что среднее содержание озона в этих точках различно и для промышленных областей

оно действительно ниже. То есть концентрация озона в горах статистически значимо выше, чем в долинах рек в рассматриваемом регионе.

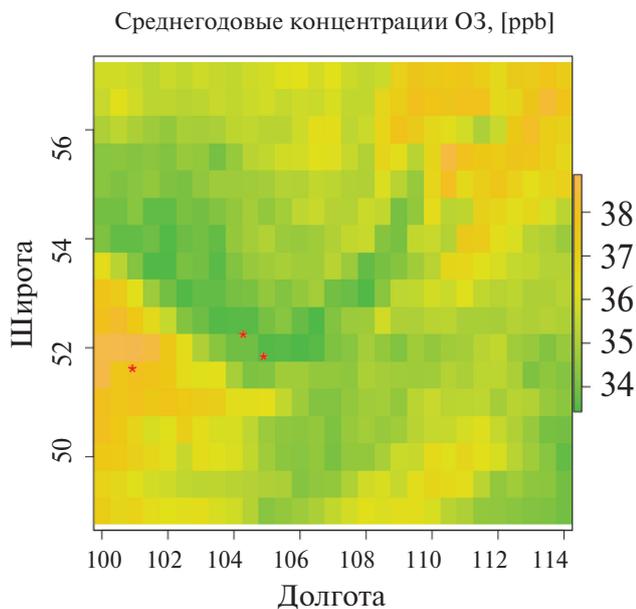


Рис. 3. Среднегодовые значения концентраций озона в Байкальском регионе по данным GOME-2 (звездочками обозначены станции EANET, где проводятся наземные измерения)

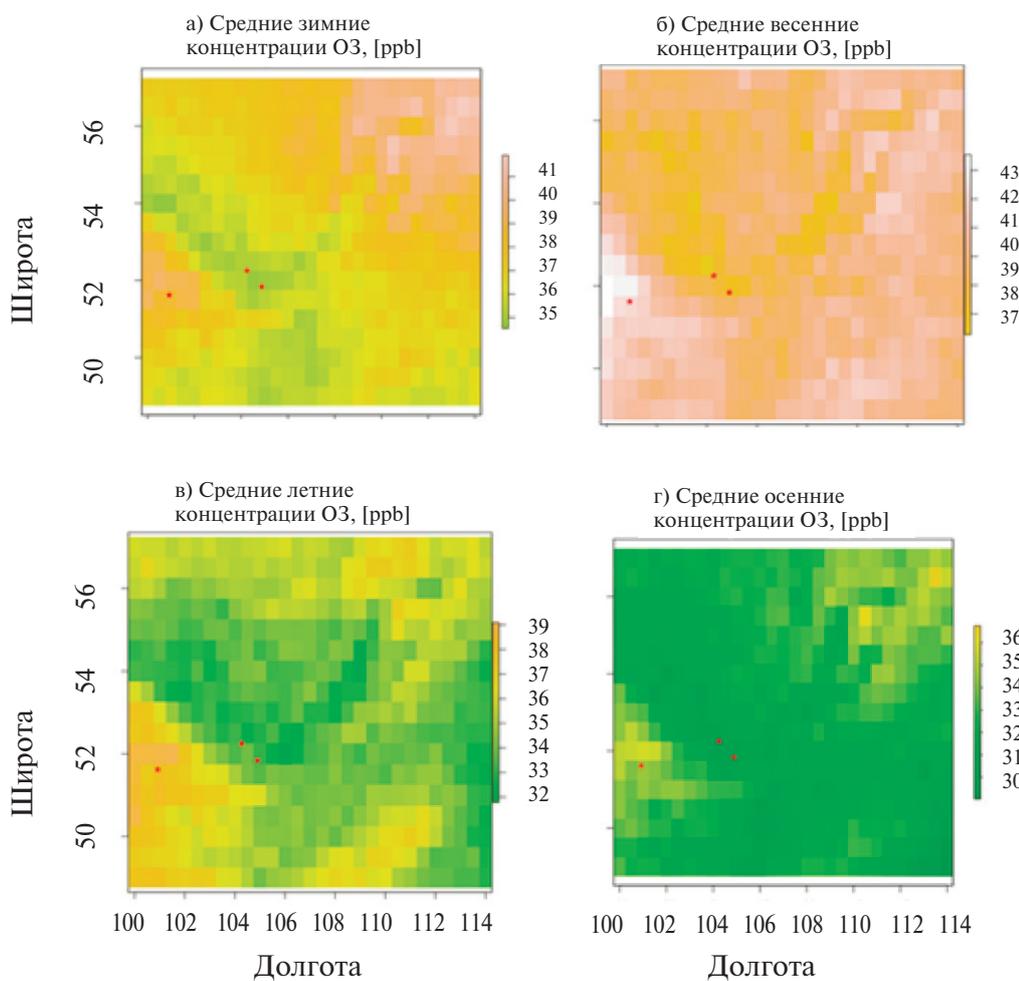


Рис. 4. Среднесезонные концентрации озона в Байкальском регионе по данным GOME-2 (звездочками обозначены станции EANET, где проводятся наземные измерения)

Заключение

Из приведенных выше результатов сравнения можно сделать вывод, что оценки, основанные на спутниковых данных, качественно и количественно верно описывают почти весь годовой ход для фоновых и внегородских территорий, за исключением начала весны, когда они оказались заниженными. Для описания условий непосредственно городского загрязнения в рассматриваемом регионе значения концентрации, рассчитанные по спутниковым данным, использовать нецелесообразно.

Следовательно, доступный для исследователей продукт профиля озона высокого разрешения, полученный с помощью измерений прибора GOME-2, может быть использован для крупномасштабной оценки средних уровней концентрации приземного озона в условиях регионального загрязнения. Полученные таким образом поля концентрации хорошо отражают как внутригодовой ход и среднесезонные уровни содержания озона у земли, так и особенности его пространственного распределения. Несмотря на то, что единичные результаты спутниковых оценок, в частности для Байкальского региона, могут не соответствовать реально измеренной концентрации при проведении зондирования, осредненные уровни загрязнения на основе годовых массивов спутниковых данных могут быть использованы для оценки пространственных различий и сезонных изменений. При накоплении спутниковой информации и результатов ее сравнения с наземными наблюдениями для отдельных точек в разных частях регионов они также станут ценным материалом для исследования антропогенного воздействия на природные экосистемы вследствие загрязнения воздуха.

Литература

1. Белан Б.Д., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Вертикальное распределение озона в тропосфере над югом Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 9. С. 777–783.
2. Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Цыдыпов В.В., Бальжанов Т.С. Изменчивость приземного озона в г. Улан-Удэ: результаты многолетних наблюдений // Вестн. Бурятского науч. центра Сибирского отделения Российской Академии наук. 2014. № 4 (16). С. 282–292.
3. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Чипанина Е.В., Маринайте И.И. Особенности пространственного распределения диоксида серы в Прибайкалье по данным маршрутных измерений и численных экспериментов // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 35–41.
4. Потемкин В.Л., Потемкина Т.Г., Гусева Е.А. Динамика атмосферного озона в условиях высокогорья // Вестн. Иркутского гос. технич. ун-та. 2015. № 3 (98). С. 93–98.
5. Хуриганова О.И., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В., Артемьева О.В., Голобокова Л.П. Концентрации озона в приземном слое тропосферы в урбанизированных, сельских и фоновых районах юга Восточной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2015. № 6. С. 579–584.
6. Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments // Atmospheric Environment. 1999. Vol. 33. Issue 12. P. 1821–1845.
7. Tuinder O. Product user manual: NRT and Offline Vertical Ozone Profile and Tropospheric Ozone Column Products / Royal Netherlands Meteorological Institute. 2015. 67 p.

On the possibility of using the GOME-2 high resolution ozone profiles for assessment of near-surface ozone concentrations

A.M. Trifonova-Yakovleva^{1,2}, S.A. Gromov¹, S.S. Gromov^{1,3}, T.V. Khodzher⁴, V.L. Potemkin⁴, V.A. Obolkin⁴

¹ *Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS
Moscow 107258, Russia*

E-mails: yakovleva.eanet@gmail.com, gromov.igce@gmail.com

² *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*

³ *Max Planck Institute for Chemistry, Mainz, Germany*

⁴ *Limnological Institute SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*

Near-surface concentrations of ozone over the Baikal region were assessed using ozone observations from GOME-2 instrument onboard the MetOp-A satellite. High resolution ozone profiles were provided by EUMETSAT. In order to verify near surface ozone concentrations obtained from satellite data, a comparison was performed with observations at ground stations. It was shown that the two measurements were consistent, that is the time series of satellite data describe well seasonal changes and are also appropriate for regional air pollution assessment. However, there are limitations on using satellite data for predicting instant ozone concentrations and urban pollution. Spatial distributions of mean annual and seasonal ozone concentrations were derived for the Baikal region. These evidence distinct seasonality in surface ozone concentrations with maxima and minima falling on spring and autumn months, respectively, throughout the entire region. According to the satellite data, ozone concentrations in remote mountainous areas are higher in comparison with those from industrial regions of Angara and Selenga river valleys.

Keywords: atmosphere pollution, ozone, regional pollution, remote sensing, EANET

Accepted: 25.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-239-247

References

1. Belan B.D., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Vertikal'noe raspredelenie ozona v troposfere nad yugom Zapadnoi Sibiri (Vertical ozone distribution in troposphere above south regions of West Siberia), *Optika Atmosfery i Okeana*, 2010, Vol. 23, No. 9, pp. 777–783.
2. Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Tsydypov V.V., Bal'zhanov T.S., Izmenchivost' prizemnogo ozona v g. Ulan-Ude: rezul'taty mnogoletnikh nablyudenii (Variability of near surface ozone concentrations: the results of long term observations), *Vestnik Buryatskogo nauchnogo tsentra SO RAN*, 2014, No. 4 (16), pp. 282–292.
3. Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Chipanina E.V., Marinaite I.I., Peculiarities of spatial distribution of sulfur dioxide in Cisbaikalia from the data of shipboard measurements and numerical experiments, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, No. 12, pp. 35–41.
4. Potemkin V.L., Potemkina T.G., Guseva E.A., Dinamika atmosfernogo ozona v usloviyakh vysokogor'ya (Dynamics of atmosphere ozone in highlands), *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, No. 3 (98), pp. 93–98.
5. Khuriganova O.I., Obolkin V.A., Potemkin V.L., Khodzher T.V., Artem'eva O.V., Golobokova L.P., Kонтсentratsii ozona v prizemnom sloe troposfery v urbanizirovannykh, sel'skikh i fonovykh raionakh yuga Vostochnoi Sibiri (Ozone concentration in the ground atmospheric layer in urban, rural, and background areas of the south of Eastern Siberia), *Optika Atmosfery i Okeana*, 2015, No. 6, pp. 579–584.
6. Sillman S., The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments, *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, Issue 12, pp. 1821–1845.
7. Tuinder O., *Product user manual NRT and Offline Vertical Ozone Profile and Tropospheric Ozone Column Products*, Royal Netherlands Meteorological Institute, 2015, 67 p.