

---

---

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

---

---

МОНИТОРИНГ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ  
ПО ДАННЫМ РОССИЙСКОГО ГЕОСТАЦИОНАРНОГО  
МЕТЕОСПУТНИКА “ЭЛЕКТРО-Л”

© 2013 г. Е. К. Крамчанинова, А. Б. Успенский\*

Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Москва

\*E-mail: [uspensky@planet.iitp.ru](mailto:uspensky@planet.iitp.ru)

Поступила в редакцию 10.09.2012 г.

Исследована возможность дистанционного мониторинга общего содержания озона (ОСО) в атмосфере по данным многоканального сканирующего устройства – геостационарного (МСУ-ГС), с отечественного метеоспутника “Электро-Л” № 1. Наряду с измерениями МСУ-ГС в трех каналах (8.2–9.2, 9.2–10.2, 10.2–11.2 мкм) для оценивания ОСО в качестве дополнительных предикторов используются данные о вертикальных распределениях температуры в озоновом слое, температуре и давлении на уровне подстилающей поверхности (результаты спутникового зондирования или прогностические данные). Построение оценок ОСО выполняется с помощью регуляризованного регрессионного алгоритма (гребневая регрессия), причем для формирования обучающих и контрольных выборок используются независимые оценки ОСО по данным аппаратуры ОМІ, установленные на спутнике EOS Aiga. Численные эксперименты по обработке реальных данных МСУ-ГС за отдельные сроки периода с ноября 2011 г. по август 2012 г. показали возможность организации регулярного мониторинга полей ОСО с высокими пространственным и временным разрешениями и приемлемым уровнем погрешности: модуль относительных средних отклонений и относительные среднеквадратичные отклонения между оценками по данным МСУ-ГС и ОМІ лежат в диапазоне 1–2% и 5–7% соответственно, в зависимости от типа подстилающей поверхности.

**Ключевые слова:** геостационарный метеоспутник, общее содержание озона, регрессионный алгоритм

DOI: 10.7868/S020596141302005X

## ВВЕДЕНИЕ

На борту отечественного геостационарного метеоспутника второго поколения серии “Электро-Л”, запущенного 20 января 2011 г. (точка стояния 76° в.д.), в качестве основной полезной нагрузки установлен сканер-имаджер МСУ-ГС (многоканальное сканирующее устройство – геостационарное). Описание космического аппарата (КА) “Электро-Л” № 1 и его полезной нагрузки, наземного сегмента и получаемых информационных продуктов, а также результатов летных испытаний и опытной эксплуатации приведено в (Асмус и др., 2012).

С помощью МСУ-ГС выполняется многоспектральная съемка всего диска Земли в видимом (три канала, разрешение в подспутниковой точке 1 км) и инфракрасном (семь ИК-каналов, разрешение 4 км) диапазонах спектра. Абсолютная (“внутренняя”) калибровка регистрируемых в 10 каналах сигналов обеспечивается референсными источниками (лампы, имитаторы абсолютно черного тела). Штатная периодичность съемки – 30 мин.

Аппаратура МСУ-ГС по своему назначению и информационным характеристикам во многом подобна сканеру-имаджеру SEVIRI европейских геостационарных метеоспутников второго поколения Meteosat-8, -9, см. напр., (Schmetz et al., 2002). Семь ИК-каналов сканера МСУ-ГС выбраны таким образом, чтобы обеспечить получение количественной информации о параметрах атмосферы, облачности и подстилающей поверхности. В частности, в канале 8 (9.2–10.2 мкм) регистрируется уходящее ИК-излучение в спектральном диапазоне полосы поглощения озона (O<sub>3</sub>) с центром вблизи 9.6 мкм, что позволяет определять ОСО в пределах видимого диска Земли. Указанный информационный продукт имеет многочисленные приложения в метеорологии, атмосферных исследованиях, включая прогноз погоды, оценку высоты тропопаузы, описание динамических и химических процессов в стратосфере.

В настоящей работе предлагается оригинальный метод дистанционной оценки ОСО по данным МСУ-ГС КА “Электро-Л” № 1. Приводятся результаты испытания метода на представитель-

ной выборке фактических данных КА “Электро-Л” № 1, подтверждающие возможность регулярного мониторинга ОСО с приемлемым уровнем погрешности.

### МЕТОД АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Наличие в составе измерений сканера МСУ-ГС “озонового” канала 9.2–10.2 мкм позволяет получать информацию о концентрации  $O_3$  в так называемом озоновом слое (между 12 и 36 км) (Поляков, Тимофеев, 2008; Jin et al., 2008; Zimmermann, 2010). Измеряемые в озоновом канале радиационные температуры  $T_r$  чувствительны к вариациям концентрации озона  $X_{O_3}(p)$ , где  $p$  – давление, и вертикального распределения температуры  $T(p)$ , а также к вариациям температуры  $T_s$  и излучательной способности  $e$  подстилающей поверхности. Этот вывод следует из анализа поведения якобианов – вариационных производных  $T_r$  по  $X_{O_3}$ ,  $T(p)$ ,  $T_s$  и  $e$  (Schmetz, 2002; Hoffman, Schmid, 2010; Zimmermann, 2010). Поэтому получение достоверных оценок  $X_{O_3}(p)$  или ОСО по спутниковым измерениям в озоновом канале требует привлечения дополнительной информации о  $T(p)$ ,  $T_s$  и  $e$  в пунктах зондирования.

Следует отметить, что измерения уходящего ИК-излучения в полосе 9.6 мкм выполняются целевой аппаратурой, установленной не только на геостационарных (“Электро-Л” № 1, Meteosat-8, -9, GOES), но и на полярно-орбитальных (NOAA, Suomi NPP, MetOp) спутниках. При этом на борту полярно-орбитальных метеоспутников нового поколения (MetOp, Suomi NPP) функционируют ИК-зондировщики высокого спектрального разрешения с большим количеством “температурных” каналов и каналов в полосе 9.6 мкм. Это позволяет получать оценки профилей  $T(p)$  и ОСО (или даже профилей  $X_{O_3}(p)$ ) без привлечения дополнительной информации, упомянутой выше (Успенский и др., 2003). В составе измерений существующей аппаратуры геостационарных метеоспутников (сканеры-имаджеры МСУ-ГС, SEVIRI) нет температурных каналов, а единственный озонный канал – грубого спектрального разрешения. Из сказанного следует возможность оценки величины ОСО по данным МСУ-ГС, но с обязательным привлечением дополнительной информации.

К настоящему времени известны статистический и физико-статистический подходы к построению оценок ОСО по данным сканеров-имаджеров геостационарных метеоспутников. При статистическом подходе (Поляков, Тимофеев, 2008, 2010; Jin et al., 2008) для “обращения” спутниковых данных используются регрессионные алгоритмы или близкие к ним алгоритмы искус-

ственных нейронных сетей (ИНС). В рамках физико-статистического подхода (Engelen, Tjemkes, 2001) численно решается нелинейная обратная задача относительно  $X_{O_3}(p)$ , для чего требуется многократно выполнять радиационные расчеты и привлекать априорную информацию об  $X_{O_3}(p)$ .

В результате летных испытаний КА “Электро-Л” № 1 установлено, что измерения в отдельных ИК-каналах МСУ-ГС имеют структурные искажения и повышенный уровень шума. С учетом того, что регрессионные алгоритмы обладают относительно слабой чувствительностью к измерительным погрешностям разной природы (по сравнению с физическим подходом), для “обращения” данных МСУ-ГС и построения оценок ОСО был выбран в качестве исходного регрессионный алгоритм (Jin et al., 2008; Hoffman, Schmidt, 2010)

$$\ln(\text{OCO}) = C_0 + \sum_{j=1}^n C_j T_r(j) + \sum_{j=1}^n C_{n+j} (T_r(j))^2 + \sum_{j=1}^m C_{2n+j} T(p_j) + C_{2n+m+1} p_s + C_{2n+m+2} L_p + C_{2n+m+3} \times (1) \\ \times \cos\left(\frac{M-6}{12}\pi\right) + C_{2n+m+4} \cos(\varphi).$$

Здесь  $C_0, \dots, C_{2n+m+4}$  – регрессионные коэффициенты;  $T_r(1), \dots, T_r(n)$  – радиационные температуры, измеренные в  $n$ -каналах;  $T(p_1), T(p_2), \dots, T(p_m)$  – значения температуры на  $m$  изобарических уровнях;  $p_s$  – давление на уровне подстилающей поверхности;  $L_p$  – доля суши в  $p$ -м пикселе,  $0 \leq L_p \leq 1$ ;  $M$  – номер месяца года,  $\varphi$  – широта.

Указанный алгоритм предложен и испытан на имитационных данных для восстановления ОСО на основе измерений 16-канального сканера-имаджера ABI будущего геостационарного спутника GOES-R/NOAA (США). Шесть ИК-каналов аппаратуры ABI и SEVIRI имеют близкие спектральные характеристики, поэтому в алгоритме (1) предложено использовать данные в восьми каналах ABI или в шести каналах SEVIRI. Из физических соображений в состав предикторов включены данные в одном озонном канале (центр канала – вблизи 9.6 мкм) и в семи “прозрачных” каналах (с минимальным поглощением водяным паром). Ввиду отсутствия в составе измерений ABI температурных каналов и зависимости сигналов в озонном и других ИК-каналах от  $T(p)$  и  $T_s$ , в состав предикторов в (1) включены значения температуры  $T(p_i)$  на 101 уровне и  $p_s$  – результаты численного прогноза погоды, поступающие из прогностического центра NCEP (США). Номер месяца ( $M$ ) и широта ( $\varphi$ ) включены в состав предикторов для учета пространственно-временной изменчивости поля ОСО. Кроме того, ввиду зависимости регрессионных

коэффициентов от локального зенитного угла наблюдений  $\theta$ , регрессии (1) строятся для набора зенитных углов  $\theta$  в диапазоне  $0^\circ-80^\circ$  с шагом  $0.5^\circ$ .

Следует также отметить, что вследствие большого количества предикторов ( $>120$ ) и отсутствия реальных измерений АВИ авторы алгоритма использовали так называемую “расчетную” регрессию, т.е. обучающие и контрольные выборки формировались с использованием модельных  $T_r$ , которые вычислялись для представительных наборов векторов состояния атмосферы,  $T_s$  и  $e$  при условии отсутствия облачности в поле зрения прибора.

Применительно к анализу данных МСУ-ГС алгоритм (1) был модифицирован. Вместо расчетной регрессии было решено использовать “эмпирическую” регрессию, т.е. формировать обучающую выборку из синхронных пространственно-совмещенных фактических измерений МСУ-ГС и предикторных переменных ( $T(p_i)$ ,  $i = 1, \dots, m$ ;  $T_s$ ). Для уменьшения количества предикторов использовались значения  $T(p_i)$  в слое  $500 - 10$  гПа,  $T_s$  и  $p_s$ . Обучающие выборки формировались отдельно для поверхностей суши и океана, поэтому предиктор  $L_p$  (признак типа поверхности) был исключен. Кроме того, согласно численным экспериментам, предикторы  $(T_r(j))^2$ ,  $j = 1, \dots, n$  можно исключить без заметного ухудшения погрешности оценивания ОСО.

Анализ фактической информации МСУ-ГС показал пригодность для тематической обработки данных в каналах 7 (8.2–9.2 мкм), 8 (9.2–10.2 мкм) и 9 (10.2–11.2 мкм), см. (Асмус и др., 2012). Данные в этих каналах имеют умеренный уровень шума. За отдельные сроки данные в канале 9 имеют структурные искажения. По результатам визуального анализа данные со структурными искажениями удалялись из обучающих и контрольных выборок.

Таким образом, регрессионный алгоритм оценивания ОСО по данным МСУ-ГС имеет вид

$$\ln(\text{ОСО}) = C_0 + \sum_{j=1}^n C_j T_r(j) + \sum_{j=1}^m C_{n+j} T(p_j) + C_{n+m+1} T_s + C_{n+m+2} p_s. \quad (2)$$

Зависимость от зенитного угла наблюдений  $\theta$  учитывалась, подобно (1), построением регрессионных коэффициентов для набора  $\theta$  в диапазоне  $0^\circ-75^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . Широтная зависимость учитывалась разбиением всей области зондирования (видимый диск Земли) на три широтные зоны: тропическая ( $23^\circ$  ю.ш.– $23^\circ$  с.ш.), северная ( $23^\circ-66^\circ$  с.ш.) и южная ( $23^\circ-66^\circ$  ю.ш.).

Эксперименты по восстановлению полей ОСО на основе реальных данных МСУ-ГС показали наличие нефизических скачкообразных изменений в величине ОСО на границе соседних “широтных” и “угловых” зон. Уменьшить подобные неоднородности можно за счет более детального разбиения общей области зондирования на зоны в зависимости от значений широты и зенитного угла  $\theta$ . Однако это приводит к многократному увеличению наборов искомого регрессионных коэффициентов  $C$ , и, кроме того, за счет уменьшения зон затрудняется формирование репрезентативных обучающих выборок (особенно для эмпирической регрессии). Зависимость регрессионных коэффициентов от зенитного угла  $\theta$  и широты  $\varphi$  можно учесть путем модификации модели (2) и явного включения в нее этих параметров

$$\ln(\text{ОСО}) = C_0 + \cos \theta \cos \varphi \sum_{j=1}^n C_j T_r(j) + \sum_{j=1}^m C_{n+j} T(p_j) + C_{n+m+1} T_s + C_{n+m+2} p_s. \quad (3)$$

Результаты испытания регрессии (3) представлены в следующем разделе.

Важным для эффективной работы алгоритма (3) является формирование обучающих выборок из пространственно-совмещенных и синхронных с измерениями МСУ-ГС данных о предиктантах ( $\ln(\text{ОСО})$ ) и предикторных переменных ( $T(p_i)$ ,  $p_s$  и  $T_s$ ). Для предикторных переменных имеются два источника: глобальные данные спутникового термического зондирования и выходные продукты численного прогноза погоды. Наиболее надежными данными об ОСО являются в настоящее время результаты мониторинга озона с полярно-орбитальных спутников. С учетом имеющихся информационных ресурсов, первоначально была исследована возможность использования глобальных данных температурного зондирования по информации ИК-зондировщика AIRS со спутника EOS Aqua (интернет-ресурс <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>). Недостатком данных спутникового зондирования являются их фрагментарность и “разновременность” – для покрытия области зондирования (видимый диск Земли с центром в точке стояния  $76^\circ$  в.д. спутника “Электро-Л” № 1) требуется композиция повитковых данных зондирования с временной дискретностью около 106 мин. Альтернативой этим данным являются выходные продукты прогностических схем глобального покрытия. В данной работе использована, подобно (Hoffman, Schmidt, 2010), прогностическая продукция NCEP (интернет-ресурс <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>), а именно глобальные поля температуры и ОСО на регулярной сетке с пространственным разрешением  $0.5^\circ$  и временной

дискретностью 3 ч. Согласно (Hoffman, Schmidt, 2010), при построении прогностических сеточных полей ОСО привлекаются в значительном объеме климатические данные о глобальном распределении озона, поэтому использовать прогностические поля ОСО для построения регрессии (3) нецелесообразно. Тем не менее указанные данные можно использовать для контроля результатов спутникового мониторинга ОСО (наряду с грубым “климатическим” контролем восстановленные значения ОСО должны находиться в диапазоне 100–500 е.Д.).

Наиболее достоверными глобальными данными об ОСО являются в настоящее время (Hoffman, Schmidt, 2010) поля ОСО, построенные по измерениям аппаратуры ОМІ спутника EOS Aura (NASA OMI Ozone Products, 2002). В качестве стандарта для сравнения указанные данные используются также при валидации оценок ОСО по данным SEVIRI (Zimmermann, 2010). Вследствие сказанного при разработке и испытании регрессионного алгоритма (3) были использованы оценки ОСО, получаемые по информации ОМІ.

Остановимся теперь на вычислительных аспектах построения и использования регрессии (3). Регрессионная модель (3), которая включает  $l = n + m + 2$  предикторов, в векторно-матричной форме имеет вид  $x = c^T y$ , где  $x = \ln(\text{ОСО})$ ,  $c = \|c_0, \dots, c_l\|^T$  – вектор регрессионных коэффициентов,  $y = \|1, T_r(1), \dots, p_s\|^T$  – вектор предикторов. Как показали численные эксперименты, оценивание вектора  $c$  методом наименьших квадратов по стандартной формуле  $\hat{c} = S_{xy} S_{yy}^{-1}$  (где  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  – выборочные кросс-ковариационная матрица  $x$  и ковариационная матрица предикторов  $y$ ) на материале обучающей выборки затруднено вследствие обнаруженной мультиколлинеарности предикторов (матрица  $S_{yy}$  близка к вырожденной). Поэтому вместо обычной регрессии был использован вариант так называемой гребневой, или регуляризованной, регрессии, в котором оценка  $\hat{c}$  строится по формуле  $\hat{c}_{\text{рег}} = S_{xy} \cdot (S_{yy} + \gamma I)^{-1}$ , где  $I$  – единичная матрица,  $\gamma > 0$  – коэффициент регуляризации, подбирается эмпирически. Кроме того, полезной с вычислительной точки зрения оказалась процедура нормирования предиктанта и предикторов на их средние значения, рассчитанные по данным из обучающей выборки (чтобы избежать работы с большими числами и обеспечить одинаковый порядок величин предиктанта и предикторных переменных). Критерием выбора подходящего  $\gamma$  является достижение минимальной погрешности оценивания  $x$  (величины погрешности  $x$  определяются на материале независимой выборки). Эксперименты с различными обучающими и контрольными выборками, сформированными из нормированных величин, поз-

волили подобрать подходящую величину  $\gamma$  (в диапазоне 0.1–0.3).

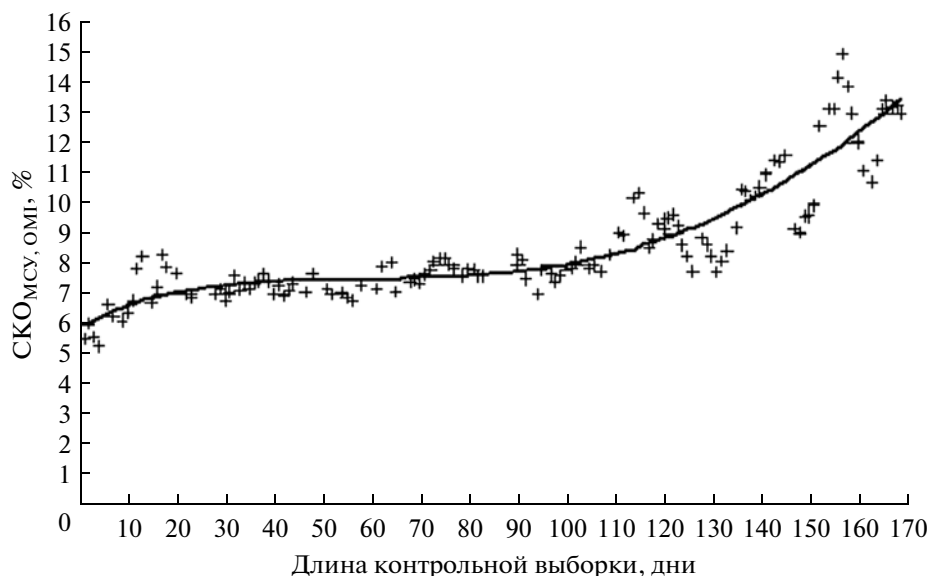
В заключение данного раздела кратко рассмотрим требования к точности и пространственно-временному разрешению спутниковых оценок ОСО. Общие требования к данным об ОСО неоднократно обсуждались в связи с разными приложениями и представлены в различных документах всемирной метеорологической организации (ВМО), см. например, (Успенский и др., 2003). Применительно к спутниковым оценкам ОСО требования меняются в зависимости от информативности целевой аппаратуры. Так, при использовании данных ABI/GOES-R оценки ОСО должны иметь пространственное разрешение не хуже 10 км, временную периодичность 1 ч, модуль среднего отклонения от истинных значений  $\Delta$  не больше 15 е.Д. и СКО не больше 25 е.Д. (Hoffman, Schmidt, 2010). Примерно такие же требования (кроме пространственного разрешения) предъявляются и к оценкам ОСО по данным SEVIRI. Наиболее высоким качеством отличаются оценки ОСО по данным ОМІ (Поляков, Тимофеев, 2010): величины  $\Delta$  и СКО не превышают 3 е.Д. (~1%) и 12 е.Д. (~4%) соответственно.

#### ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО АНАЛИЗУ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МСУ-ГС

Отработка и испытания регрессионного алгоритма (3) проводились на выборке данных измерений МСУ-ГС за отдельные сроки периода ноябрь 2011 г.–август 2012 г. Помимо данных МСУ-ГС, привлекались спутниковые оценки ОСО<sub>ОМІ</sub>, получаемые по информации ОМІ, и прогностические данные NCEP (профили температуры  $T(p_i)$ , поля температуры поверхности  $T_s$  и давления на уровне поверхности  $p_s$ ). Восстановление поля ОСО<sub>МСУ</sub> проводилось в полном поле зрения прибора МСУ-ГС для зенитных углов  $0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ . Периодичность данных МСУ-ГС составляет 30 мин, данных NCEP – 3 ч, данных ОМІ – 1 сут.

Алгоритм (3) разрабатывался применительно к измерениям МСУ-ГС при отсутствии облачности в поле зрения прибора. Для выделения “безоблачных” фрагментов в области зондирования анализировались данные измерений МСУ-ГС в канале 1 (0.5–0.65 мкм) видимого диапазона спектра за срок 06:00 UTC (в этот срок достигается максимальная по площади освещенность диска Земли, находящегося в поле зрения прибора МСУ-ГС). “Безоблачные” фрагменты выделялись с помощью пороговой процедуры.

Длительность временных периодов (количество дней), для которых формировались обучающие и контрольные выборки, влияют на точность восстанавливаемых полей ОСО. В численных



**Рис. 1.** Усредненное по всей расчетной области среднее квадратическое отклонение  $OSO_{МСУ}$  от  $OSO_{ОМІ}$  в зависимости от периода использования регрессионных коэффициентов.

экспериментах периоды накопления обучающей и контрольной выборок варьировались от 3 дней до одного месяца и от одного дня до 5 с половиной месяцев соответственно. На рис. 1 представлена зависимость усредненного по всей области зондирования среднее квадратическое отклонение оценок  $OSO_{МСУ}$  от оценок  $OSO_{ОМІ}$  ( $СКО_{МСУ-ОМІ}$ ). Регрессионные коэффициенты были рассчитаны по 15-дневной обучающей выборке (с 1 по 15 марта), а алгоритм (3) применялся для восстановления  $OSO$  к данным из независимой контрольной выборки (с 16 марта по 31 августа 2012 г. — 169 дней). Наименьшее  $СКО_{МСУ-ОМІ}$  (~6%) достигается, естественно, при восстановлении  $OSO$  в течение суток, следующих непосредственно за периодом

накопления обучающей выборки. Однако столь частое обновление регрессионных коэффициентов ведет к неоправданно высоким затратам вычислительных ресурсов. Если принять допустимым ухудшение точности восстановления  $OSO$  в пределах 1%, то применение алгоритма (3) без обновления регрессионных коэффициентов возможно в течение ~20 дней.

В табл. 1 и 2 представлена статистика сравнений оценок  $OSO_{МСУ}$  и  $OSO_{ОМІ}$  (отдельно над поверхностью суши и над водной поверхностью) с усреднением по месячным периодам. Обозначения:  $N$  — количество пикселей МСУ-ГС;  $b_{МСУ}$  — среднее значение,  $\sigma_{МСУ}$  — стандартное отклонение поля  $OSO_{МСУ}$ ;  $\Delta$  — модуль среднего отклонения,

**Таблица 1.** Статистика сравнения оценок  $OSO_{МСУ}$  и  $OSO_{ОМІ}$  над поверхностью суши

Месяц, год	Количество дней	$N$	$b_{МСУ}$ , е.Д.	$\sigma_{МСУ}$ , е.Д.	$ \Delta $ , %	$\sigma$ , %	СКО, %
ноябрь 2011	7	111214	279.6	21.3	0.7	5.8	5.9
декабрь 2011	13	229545	274.6	24.6	0.1	5.8	6.0
март 2012	19	304261	311.7	59.0	0.8	5.5	5.6
апрель 2012	11	176111	296.7	37.0	1.0	6.5	6.6
май 2012	18	281981	301.0	31.1	1.1	5.4	6.2
июнь 2012	8	108641	288.4	17.1	0.1	4.8	4.9
июль 2012	22	338492	284.8	15.1	0.2	4.0	4.1
август 2012	23	359502	282.2	11.1	0.04	3.6	3.7
Среднее					0.6	5.4	5.6

**Таблица 2.** Статистика сравнения оценок  $OSO_{МСУ}$  и  $OSO_{ОМІ}$  над водной поверхностью

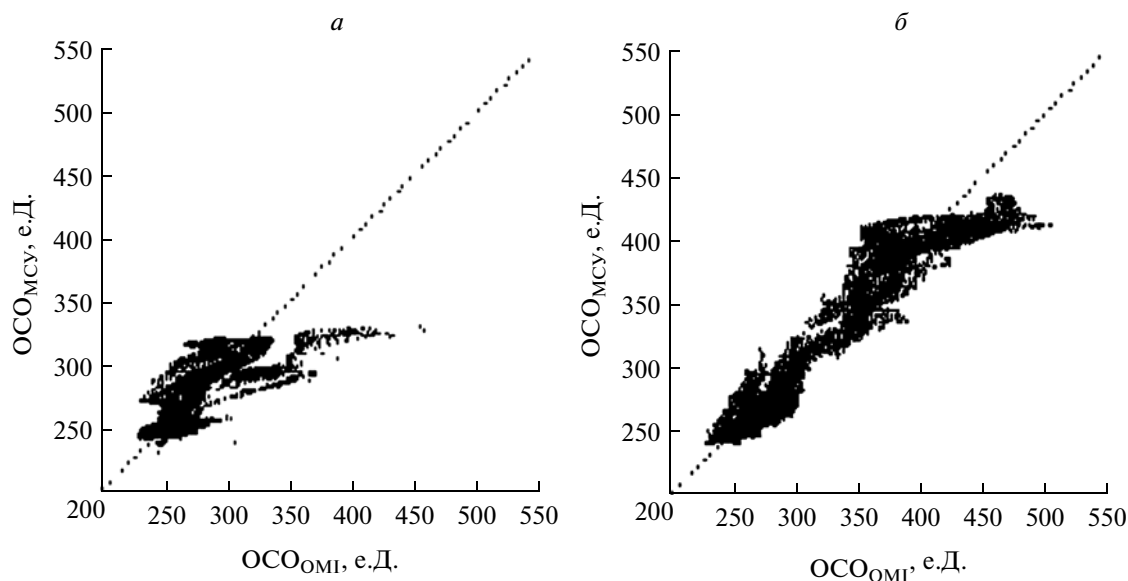
Месяц, год	Количество дней	$N$	$b_{МСУ}$ , е.Д.	$\sigma_{МСУ}$ , е.Д.	$ \Delta $ , %	$\sigma$ , %	СКО, %
ноябрь 2011	7	100441	281.0	28.5	0.2	5.4	5.4
декабрь 2011	13	189005	267.1	19.5	0.9	5.6	6.3
март 2012	19	353356	268.8	17.5	1.0	6.9	7.1
апрель 2012	11	205456	269.6	10.6	0.5	6.2	6.4
май 2012	18	378569	276.4	14.3	0.3	6.9	7.0
июнь 2012	8	154971	280.4	16.9	0.5	5.3	5.4
июль 2012	22	492994	287.6	25.4	0.7	6.0	6.1
август 2012	23	531742	301.1	37.2	0.5	5.9	6.1
Среднее					0.6	6.0	6.2

$\sigma$  – стандартное отклонение, СКО – среднеквадратическое отклонение разности  $OSO_{МСУ} - OSO_{ОМІ}$ ; величины  $\Delta$ ,  $\sigma$ , СКО выражены в процентах от  $b_{МСУ}$ . Если оценки  $OSO_{ОМІ}$  принять за “истинные”, то данные табл. 1, 2 позволяют судить о погрешности оценок  $OSO_{МСУ}$ . Средние по всей выборке значения  $\Delta$  и СКО составляют 0,5% и 5,7–6,1%, что не превышает 2 и 17 е.Д. С учетом точности оценок  $OSO_{ОМІ}$  (~3 и ~12 е.Д.), полученные уровни погрешности оценок  $OSO_{МСУ}$  являются вполне приемлемыми.

На рис. 2 (см. на цветной вклейке) дан пример картирования полей  $OSO_{МСУ}$  (а) и  $OSO_{ОМІ}$  (б) за 16 марта 2012 г., 06:00 UTC. При визуализации полей оценок  $OSO_{МСУ}$  (которые строились для каж-

дого пиксела МСУ-ГС) и  $OSO_{ОМІ}$  разрешение данных ОМІ (~24 км) приведено к разрешению данных МСУ-ГС (линейный размер пиксела 4–10 км). Из сравнения частей рис. 2а и б следует удовлетворительное качественное соответствие обоих полей, за исключением отдельных областей над водными акваториями в северном полушарии, где оценки  $OSO_{МСУ}$  явно занижены (например, над Черным морем).

Количественные расхождения между оценками  $OSO_{МСУ}$  и  $OSO_{ОМІ}$ , в дополнение к табл. 1 и 2, иллюстрируются “диаграммами рассеяния”, представленными на рис. 3. Как видно из этого рисунка, погрешности оценок  $OSO_{МСУ}$  заметно возрастают при больших концентрациях  $O_3$  (>350 е.Д.).



**Рис. 3.** Количественное сравнение оценок  $OSO_{МСУ}$  и  $OSO_{ОМІ}$  от 16 марта 2012 г., 06:00 UTC: а – над водной поверхностью; б – над поверхностью суши.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен оригинальный метод дистанционного картирования полей ОСО по данным измерений сканера-имаджера МСУ-ГС с отечественного геостационарного спутника “Электро-Л” № 1. Для дистанционного определения ОСО используется алгоритм гребневой регрессии, данные измерений МСУ-ГС в трех ИК-каналах, классифицированные как “безоблачные”, а также дополнительная информация (прогностические данные о профилях температуры  $T(p)$ , величинах  $T_s$  и  $p_s$  в пунктах зондирования).

Выполнены массовые численные эксперименты по картированию полей ОСО предложенным методом на основе реальных данных МСУ-ГС, поступавших в период с ноября 2011 г. по август 2012 г. (за срок 06:00 UTC). Данные МСУ-ГС со структурными искажениями и повышенным уровнем шума удалялись из обучающих и контрольных выборок.

Сравнение полученных оценок  $OSO_{МСУ}$  с независимыми спутниковыми оценками  $OSO_{ОМІ}$ , принятыми за “истину”, показало возможность организации регулярного мониторинга полей ОСО с приемлемым уровнем погрешности. Величины средних абсолютных отклонений и среднеквадратичных отклонений между обоими видами оценок, отнесенные к средним по области зондирования значениям ОСО, лежат в диапазоне 0.6–1.5% и 5–7% в зависимости от типа подстилающей поверхности и общего количества дней (сроков), для которых формировались обучающие и контрольные выборки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асмус В.В., Дядюченко В.Н., Загребав В.А. и др. Развитие космического комплекса гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии “Электро-Л” // Вестн. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2012. Вып. 1. С. 3–14.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Определение общего содержания озона с геостационарных спутников Земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 804–811.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Усовершенствованная методика определения общего содержания озона с помощью аппаратуры SEVIRI на геостационарных спутниковых МЕТЕОСАТ // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 42–45.
- Успенский А.Б., Романов С.В., Троценко А.Н. Моделирование дистанционных измерений вертикального распределения озона в атмосфере по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 1. С. 49–57.
- Engelen R.J., Tjemkes S. Ozone retrievals from GOES sounder observations // The 2001 Eumetsat Meteorol. Sat. Conf. Antalia, Turkey, 2001. P. 255–262.
- Hoffman J., Schmidt C. ABI Ozone Detection. ATBD // NOAA/NESDIS/STAR. Ver. 2.0. Sept. 30, 2010. 43 p.
- Jin X., Li J., Schmidt C. et al. Retrieval of total column ozone from imagers onboard geostationary satellites // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2008. V. 46. № 2. P. 479–488.
- NASA. OMI Ozone Products, OMI Algorithm Theoretical Basis Document // Techn. Note ATBD-OMI-02 / Ed. P.K. Bhatia. 2002. 91 p.
- Schmetz J., Pili P., Tjemkes S. et al. An introduction to Meteosat Second Generation (MSG) // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2002. V. 83. P. 977–992.
- Zimmermann J. Total ozone factsheet // EUM/OPS/DOC/09/5179. v1A Draft. 7 Oct. 2010. 12 p.

## Monitoring of the Ozone Total Column Values from Russian Geostationary Meteorological Satellite Electro-L

E. K. Kramchaninova, A. B. Uspensky

State Research Center of Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow

The capabilities to monitor the total ozone column (TOC) values have been investigated using imager MSU-GS (Multichannel Scanning Unit-Geostationary) measurements from Russian geostationary meteorological satellite Electro-L N1. The proposed linear regression algorithm (ridge-regression) for TOC estimation uses as predictors the MSU-GS measurements in 3 IR channels (8.2–9.2, 9.2–10.2, 10.2–11.2  $\mu\text{m}$ ) along with data on atmospheric temperature profiles within the “ozone” layer and on surface temperature. The last predictors are satellite sounding products or output results of numerical weather prediction (NWP) schemes. The generation of training and control samples is performed using spatiotemporal consistent MSU-GS measurements, NWP forecasts and independent satellite-based TOC estimates (from OMI/Aura data). The development and adjustment of proposed algorithm as well as its verification were carried out using real MSU-GS data for various dates in November, December, 2011, and March, July, August 2012. The experiments on TOC retrieval demonstrate the ability to monitor the TOC values with reasonable errors level: the comparison to respective OMI-based TOC estimates gives the relative absolute biases in the range 1–2%, while the relative RMSE value are about 5–7%.

**Keywords:** geostationary meteorological satellite, total ozone column, regression algorithm

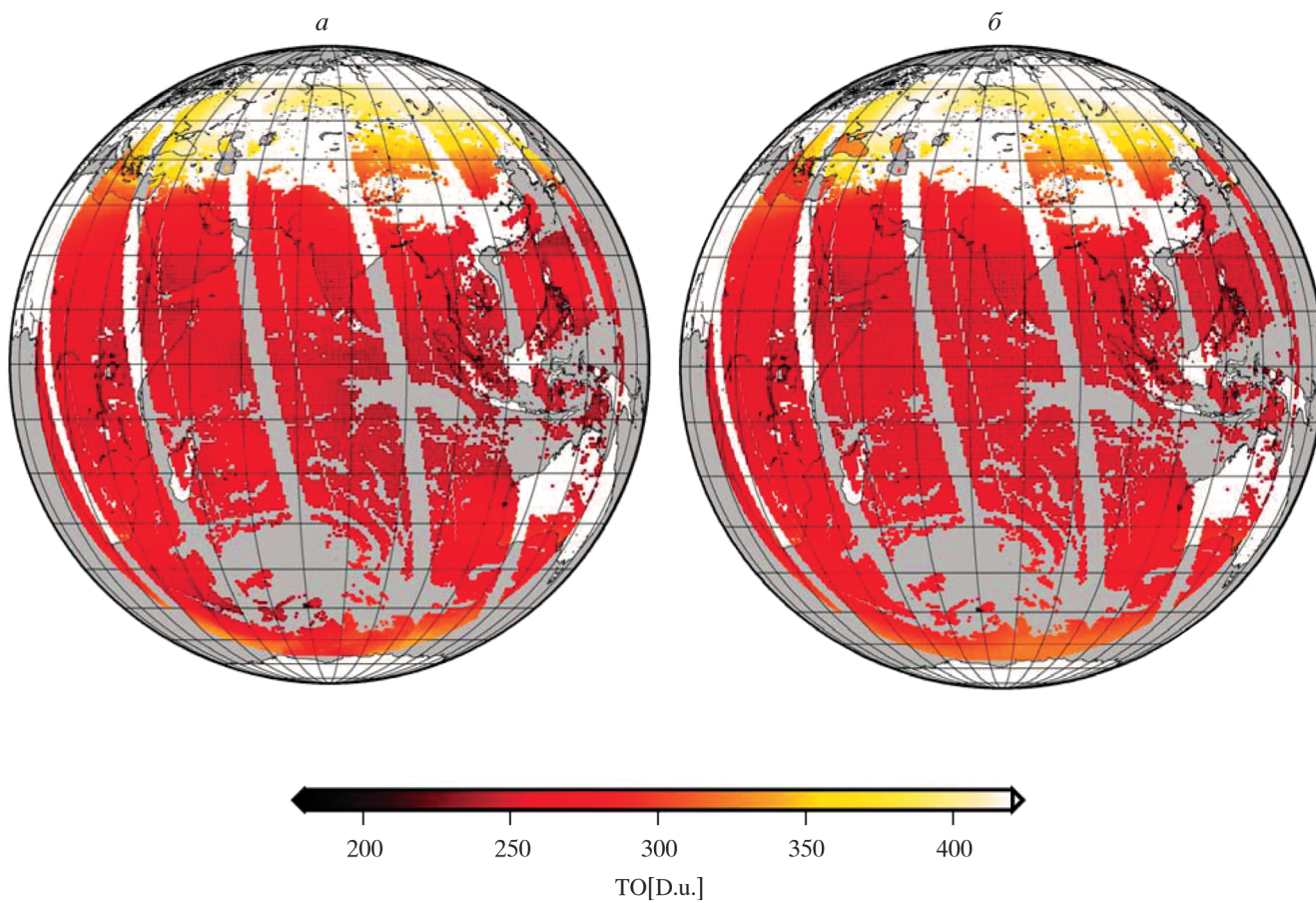


Рис. 2. Пример восстановления поля ОСО по данным МСУ-ГС от 16 марта 2012 г., 06:00 UTC:  $a - \text{OCO}_{\text{OMI}}$ ;  $b - \text{OCO}_{\text{МСУ}}$ .

