

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ,  
ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК [551.510.534+551.524.7] : 551.513(571.1)

Г.М. Крученицкий<sup>1</sup>, В.Н. Маричев<sup>2</sup>

**Влияние глобальных геофизических процессов  
на изменчивость вертикального распределения озона,  
температуры и аэрозоля над Западной Сибирью**

<sup>1</sup>Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 23.08.2007 г.

На основе данных лидарного зондирования озона, аэрозоля и температуры в стратосфере над Томском изучено влияние мировых центров действия на их вертикальное распределение путем построения регрессионных моделей. В качестве моделируемых величин привлекались помесечно осредненные профили озона, аэрозоля и температуры, в качестве регрессоров — состояние мировых центров действия и температура поверхности ряда акваторий Мирового океана. Значения регрессоров использовались с нулевым лагом и лагом –1 мес. Такой подход позволил существенно повысить эффективность моделирования (значения коэффициентов детерминации регрессионных моделей) по сравнению с первоначальными результатами. Кроме того, использование значений регрессоров с ненулевым лагом позволило оценить постоянную времени процессов, определяющих влияние мировых центров действия на формирование температуры, концентрации озона и оптической активности аэрозоля на различных высотах.

**Введение**

В нашей работе [1] изложены результаты оценки влияния глобальных геофизических факторов (ГГФ) на вертикальное распределение озона (ВРО) и температуры (ВРТ) над Западной Сибирью. Эти оценки были получены по данным лидарного зондирования, выполненного в г. Томске в зимний период 1996–2000 гг. на основе регрессионной модели для помесечно осредненных профилей ВРО и ВРТ. В настоящей статье регрессионная модель модифицирована за счет включения в число регрессоров значений ГГФ с лагом – 1 мес. В качестве моделируемых профилей были дополнительно привлечены профили вертикального распределения аэрозоля (ВРА).

**1. Исходные данные**

Диапазон высот зондирования составил 10–50 км, распределение исходных данных во времени представлено на рис. 1.

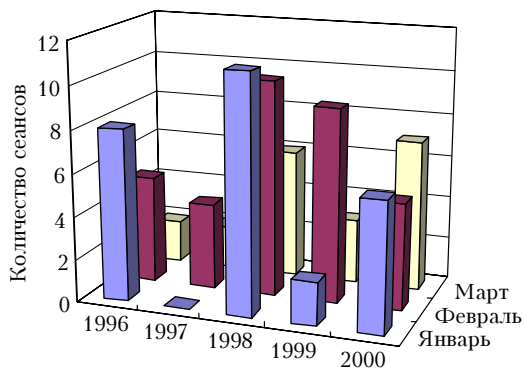


Рис. 1. Помесечное количество сеансов лидарного зондирования

На рис. 2 приведены примеры профилей отношения полного обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к обратному молекулярному, а также вертикального распределения озона и температуры.

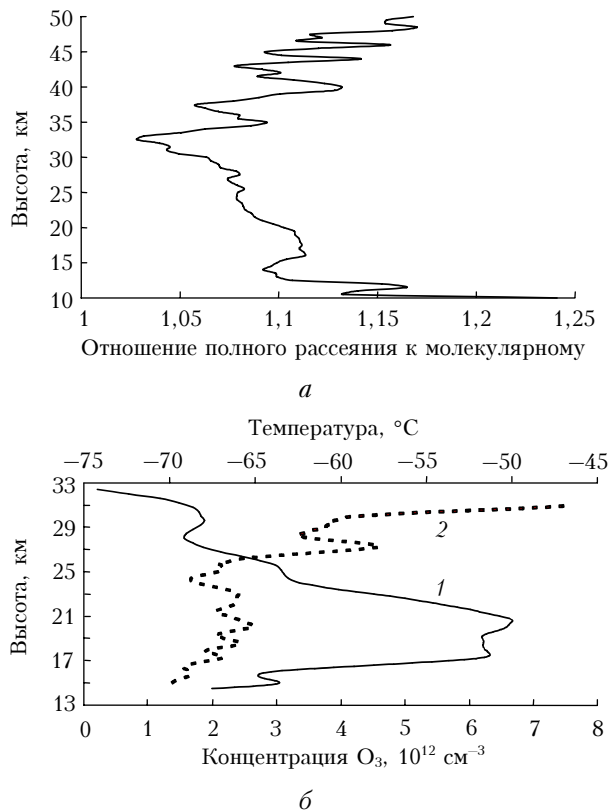


Рис. 2. Пример результатов лидарного зондирования (26 января 1996 г.): а – ВРА; б – ВРО (1) и ВРТ (2)

В качестве регрессоров были испытаны индекс солнечной активности  $F_{10.7}$  ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SOLAR\\_RADIO/FLUX/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/FLUX/)), а также различные атмосферные и океанические индексы, вычисляемые Национальным центром климатических прогнозов США (National Climate Prediction Center – NCEP) и доступные на сайте (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Все регрессоры были представлены, как и моделируемые значения отношения полного рассеяния к молекулярному, в виде рядов, осредненных по интервалу 1 мес. Среди них:

– индексы среднего по экватору зонального ветра на уровне 30 (w30) и 50 (w50) мбар (аналоги зонального ветра в Сингапуре) – КДК<sub>30</sub> и КДК<sub>50</sub> соответственно;

– индексы южного, арктического, североатлантического, тихоокеанского, североатлантического и антарктического атлантического колебаний – SOI, AO, NAO, PNA и AAO соответственно;

– температуры поверхности океанов: Тихого – Nino 1 + 2 (0–10S, 90W–80W), Nino 3 (5N–5S, 150W–90W), Nino 3.4 (5N–5S, 170–120W), Nino 4 (5N–5S, 160E–150W) и Атлантического – «Северная Атлантика» (5–20N, 60–30W), «Южная Атлантика» (0–20S, 30W–10E), «Тропическая Атлантика» (10N–10S, 180W–180E) (Разумеется, взятые в кавычки названия очень условны, так как отражают расположение соответствующих областей Атлантики относительно экватора и не соответствуют традиционной географической терминологии.);

– средняя зональная температура (z500t) на уровне 500 гПа;

– уходящая длинноволновая радиация (OLR) на экваторе (160E–160W). Более детальное описание регрессоров можно найти на указанном сайте. Кроме перечисленных в качестве регрессоров использовалась огибающая КДК<sub>30</sub> –  $r_s(t)$ , полученная из индекса зонального ветра  $s(t)$  его пропусканием через численно синтезированный гетеродинный приемник. Эта огибающая связана с указанным индексом соотношением

$$r_s(t) \sim a \int_0^{\infty} s(\tau) \sin(2\pi f_g \tau) \times \left[ \frac{\sin 2\pi F(t - \tau)}{t - \tau} + \frac{\sin 2\pi F(t + \tau)}{t + \tau} \right] d\tau, \quad (1)$$

где  $f_g = 1/28 \text{ мес}^{-1}$  – частота гетеродина;  $F = 1/132 \text{ мес}^{-1}$  – верхняя граница полосы пропускания фильтра низкой частоты.

Здесь необходимо небольшое пояснение. Обычно в качестве регрессоров в статистическом моделировании озоносферных процессов используют наряду с КДК<sub>30</sub> и КДК<sub>50</sub>. Это обусловлено тем, что оба колебания сдвинуты относительно друг друга на 7 мес – четверть периода основной частоты КДК (несущей), равной 28 мес (отсюда значение  $f_g = 1/28 \text{ мес}^{-1}$ ). Таким образом, пара КДК<sub>30</sub> и КДК<sub>50</sub> – это аналог синуса и косинуса в обычном гармоническом разложении. При выделении огибающей КДК фазовые особенности сигнала на несущей частоте

учитываются фазировкой гетеродина – синусной и косинусной. Если демодулировать КДК<sub>30</sub> с использованием синусной фазировки гетеродина, то выход приемника практически такой же, как при гетеродинировании КДК<sub>30</sub> с использованием косинусной фазировки, и наоборот. Огибающая, полученная при косинусной фазировке гетеродина для выделения огибающей КДК<sub>30</sub>, не оказалась значимым регрессором ни для одного из анализируемых процессов.

## 2. Построение модели

Моделированию подвергались отклонения ВРА, ВРО и ВРТ от среднемесячных значений, полученных межгодовым осреднением (остатки сезонного хода). Все регрессоры использованы в нормализованном виде, т.е. после центровки на нулевое среднее значение и нормировки на единичную дисперсию. Ввиду ограниченной временной протяженности исходных рядов и значительного числа тестируемых регрессоров построение регрессионной модели осуществлялось с помощью специальной рекуррентной процедуры, ранжирующей регрессоры по их статистической значимости с последующим исключением вклада наиболее значимого регрессора из моделируемого процесса, а самого регрессора из числа тестируемых при моделировании остатков. Обрыв рекуррентной процедуры осуществлялся при значениях статистики Стьюдента для наиболее значимого регрессора более 5%. Блок-схема алгоритма построения регрессионной модели приведена на рис. 3.

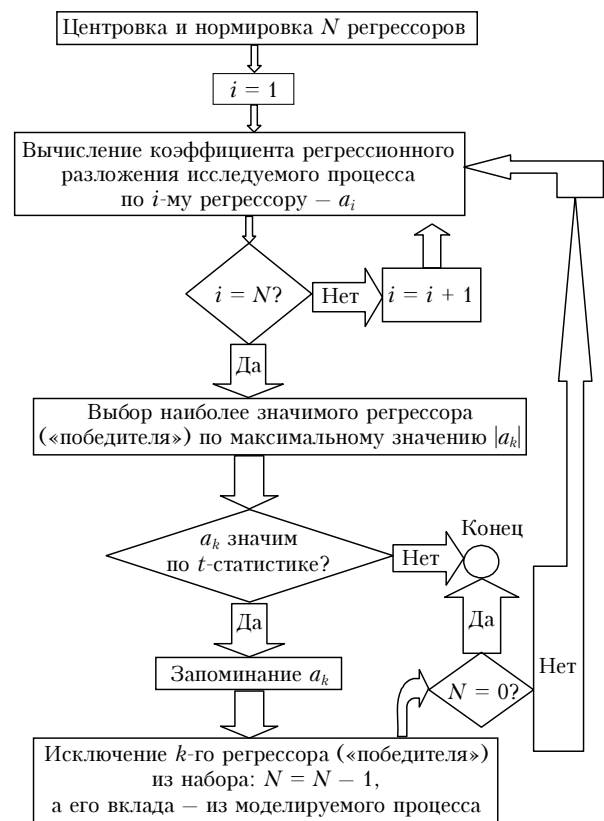


Рис. 3. Блок-схема построения регрессионной модели для числа регрессоров больше числа отсчета

Построение модели осуществлялось в двух вариантах:

- в первом значения регрессоров брались для того же месяца, что и значения моделируемого процесса (синхронная модель);
- во втором значения регрессоров брались для месяца, предшествующего моделируемому (лаг – 1 мес).

### 3. Результаты моделирования

Результаты моделирования коэффициента аэрозольного рассеяния приведены на рис. 4.

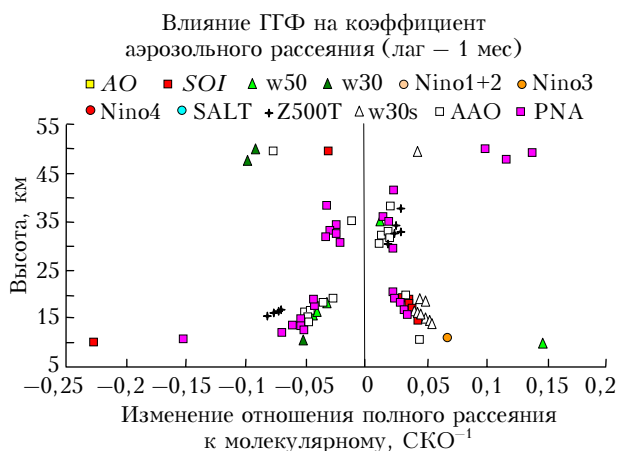
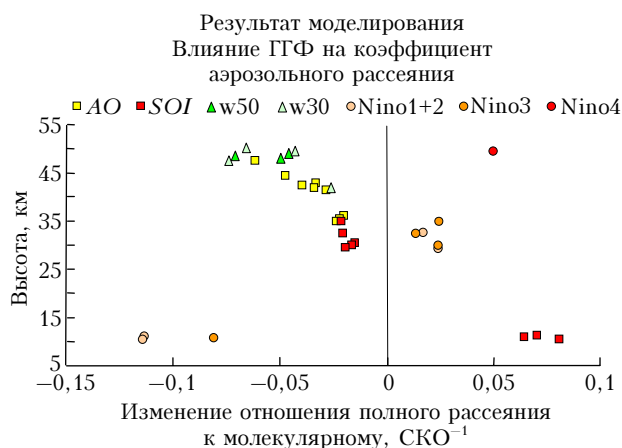


Рис. 4. Результаты моделирования влияния ГГФ на профили аэрозольного рассеяния: а – синхронная модель; б – модель с лагом – 1 мес

Для того чтобы сравнивать влияние различных ГГФ, изменения отношения полного рассеяния к молекулярному нормированы на среднее квадратическое отклонение (СКО). Из рис. 4 видно, что большинство ГГФ сказываются на состоянии аэрозольного слоя над Западной Сибирью с некоторой задержкой. Более того, из физических соображений ясно, что именно так и должно быть, так как центры действия большинства ГГФ сосредоточены в экваториальной зоне. Что же касается синхронной модели (первый вариант), то регрессионные связи в ней, видимо,

обусловлены не механизмом причинно-следственной связи (изменения ГГФ влияют на аэрозоль), а тем, что синхронные изменения в ГГФ и состояния аэрозольного слоя над Западной Сибирью являются следствием одной причины. Причинно-следственные же связи устанавливает вторая модель (с лагом). Корреляцию модельных профилей с реально наблюдаемыми иллюстрирует рис. 5.

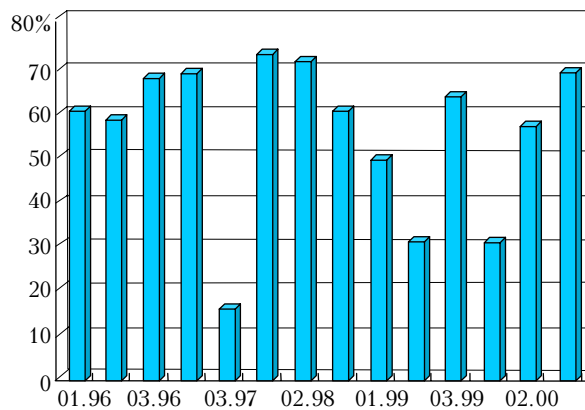


Рис. 5. Корреляция модели с месячно осредненными профилями ВРА

Видно, что в целом корреляция вполне удовлетворительная, исключая отдельные месяцы (март 1997, февраль 1999, январь 2000). Для выяснения причин этого эффекта была построена модель сезонного хода альбедо над Томской областью (рис. 6) по данным измерений отражаемости аппаратурой TOMS и проанализированы отклонения от этой модели (рис. 7) (TOMS – Total Ozone Measurement System – спутниковый прибор для измерения общего содержания озона, отражаемости и аэрозольного индекса, эксплуатируемый (с небольшими перерывами) на различных КА с конца октября 1978 г.).

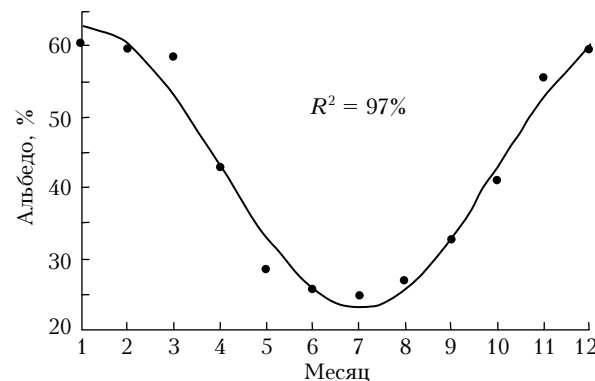


Рис. 6. Климат альбедо Томской области: кривая – первая гармоника годового хода; • – среднемесячные значения

На рис. 6 приведена величина коэффициента детерминации, определяемого как  $R^2 = 1 - \sigma_{rest}^2 / \sigma_u^2$  (здесь  $\sigma_u^2$  и  $\sigma_{rest}^2$  – дисперсии ряда и остатка модели), который характеризует качество модели.

Результаты анализа свидетельствуют, что низким значениям корреляции модельных и реально наблюдаемых профилей аэрозольного рассеяния со-

ответствуют положительные аномалии альbedo, сопутствующие в Томской области выраженной циклонической циркуляции. Это позволяет сделать следующие выводы, относящиеся к влиянию ГГФ на ВРА:

- ГГФ оказывают существенное влияние на формирование профилей ВРА над Западной Сибирью, определяя в среднем более трети их изменчивости;
- диапазон высот влияния ГГФ распадается на две области: выше 28 км и ниже 23 км, в которых влияние ГГФ в основном противофазно;
- влияние ГГФ сильно снижается в условиях выраженной циклонической циркуляции.

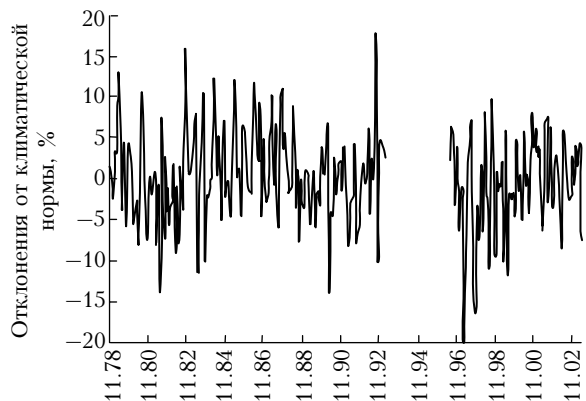


Рис. 7. Отклонения альbedo Томской области от климатической нормы

Моделирование воздействия ГГФ на ВРО и ВРТ по первому варианту было осуществлено ранее и его результаты опубликованы в [1]. Представление о качестве моделирования по второму варианту дают рис. 8 и 9.

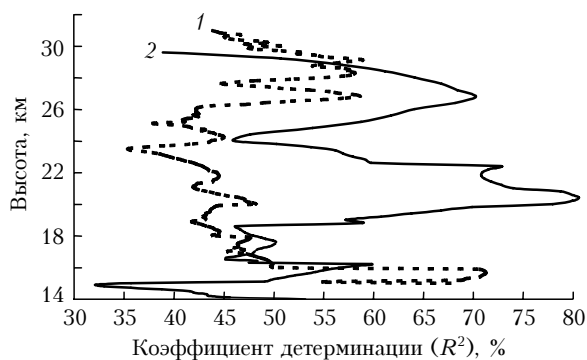


Рис. 8. Сравнительная эффективность регрессионного моделирования ВРО и ВРТ: 1 – температура; 2 – озон

Полная эффективность регрессионных моделей для озона и температуры составляет в среднем по высоте более 50%. Высотный ход коэффициентов регрессии моделей ВРО и ВРТ на значения ГГФ с лагом  $-1$  мес (т.е. связанных причинно-следственной связью с изменениями озона и температуры) иллюстрирует рис. 10.

Из рисунка видно, что вариации температуры стратосферы над Западной Сибирью в широком диапазоне стратосферных высот формируются в основ-

ном изменениями в зональной компоненте экваториального ветра на уровне 50 мбар. Это неудивительно, так как хорошо известно, что стратосферные потепления и похолодания тесно связаны с квазидвухлетними колебаниями этой компоненты. Обращает на себя внимание значительная величина коэффициента регрессии от 5 до  $6,5$  °C на СКО. Это значит, что КДК ответственны за большую часть динамического диапазона изменчивости температуры в нижней стратосфере над Западной Сибирью.

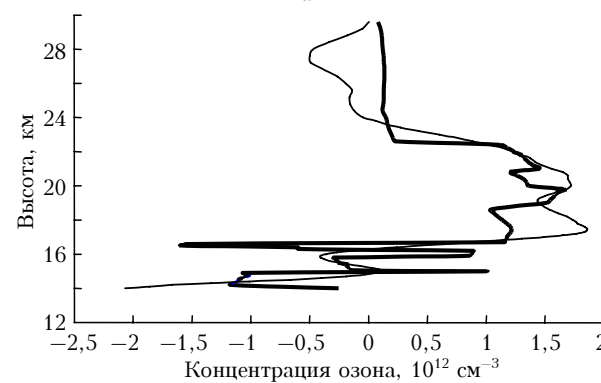
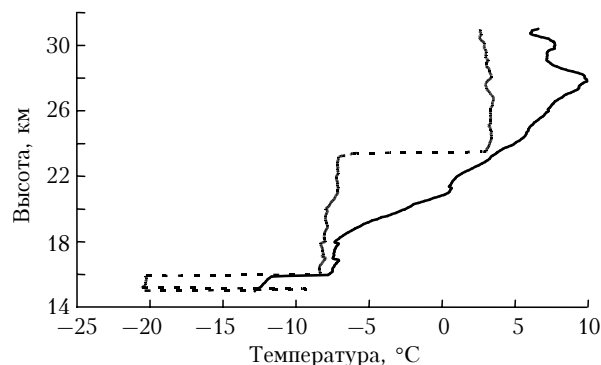


Рис. 9. Сравнение модели с ВРТ: *a* – остатки сезонного хода (сплошная линия), модель (пунктирная) и ВРО; *b* – остатки сезонного хода (тонкая линия) и модель (жирная) в январе 1996 г.

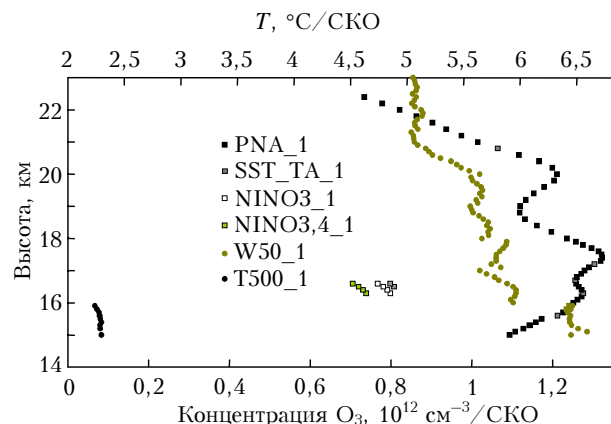


Рис. 10. Результаты моделирования влияния значений ГГФ с лагом  $-1$  мес на ВРТ и ВРО. Значки серого цвета – отклик температуры, черные квадраты – озона

Небольшой высотный диапазон вблизи тропопаузы испытывает влияние среднеглобальной температуры на уровне 500 мбар, что также представляется вполне естественным.

Основным фактором, определяющим вариации озона в широком диапазоне высот, является индекс северо-тихоокеанского колебания, что тоже имеет вполне разумное объяснение: этот индекс в значительной мере определяет положение циркумполярного вихря. Отдельного обсуждения заслуживает то обстоятельство, что небольшой высотный диапазон между 16 и 17 км оказался подверженным влиянию температуры поверхности Мирового океана на таких акваториях, как тропическая Атлантика и восточная часть приэкваториальной зоны Тихого океана. В принципе, то обстоятельство, что увеличение температуры приводит к увеличению концентрации озона в нижней части климатического максимума ВРО (рис. 11), дает основание предполагать, что восходящие транс-тропосферные потоки над названными акваториями замыкаются над Западной Сибирью, где нисходящий поток приводит к росту концентрации озона в соответствии с принципом Нормана–Добсона. Такого рода механизмы, применительно к этим акваториям, обсуждаются, например, в работе [2], посвященной анализу влияния Эль-Ниньо на озоносферные процессы.

Однако малая величина диапазона высот, в котором проявляется влияние температуры тропических

акваторий Мирового океана и небольшой объем экспериментального материала, на котором построена регрессионная модель, не дают оснований считать это предположение обоснованным всерьез.

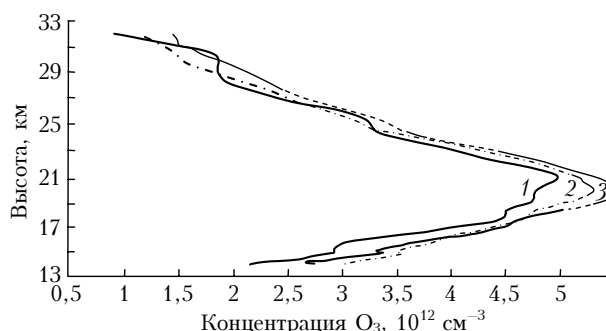


Рис. 11. Усредненные ВРО в нижней стратосфере над Томском: 1 — январь; 2 — февраль; 3 — март [1]

1. Маричев В.Н., Галкина И.Л., Крученицкий Г.М. Влияние глобальных геофизических процессов на формирование глобального распределения озона и температуры над Западной Сибирью // Метеорол. и гидрол. 2003. № 11. С. 44–53.
2. Черников А.А., Борисов Ю.А., Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Перов С.П., Сидоренков Н.С., Стасюк О.В. Воздействие явления Эль-Ниньо 1997–1998 гг. на озоновый слой Земли // Метеорол. и гидрол. 1998. № 3. С. 104–110.

*G.M. Kruchenitskii, V.N. Marichev. Influence of global geophysical processes on variability of ozone, temperature, and aerosol vertical distribution over West Siberia.*

Based on lidar sounding of ozone, aerosol, and temperature in the stratosphere over Tomsk, the influence of the world modification centers on their vertical distribution has been investigated through constructing regression models, which included parameters, such as monthly mean profiles of ozone, aerosol and temperature, and regressors, i.e. indexes of sub-global variations of atmospheric pressure, as and surface temperature of a number of the World Ocean areas. Regressor values were used with a zero and a month's lags. This approach significantly increased modeling efficiency (the values of determination coefficients in regression models) as compared with the initial results. Moreover, the use of regressor values with a zero lag enabled the evaluation of a time constant for processes governing the impact of the world action centers on temperature, ozone concentration, and optical activity of aerosol at different heights.