

длин волн при равномерном распределении времени измерений). Для экспресс-наблюдения при $z = 89^\circ$ оптимизация обеспечивает уменьшение погрешности до 21% (14 км) и до 25% (14 км) в зависимости от суммарного времени наблюдения. Характерным для распределения времени в оптимизированном методе обращения является то, что при всех углах измерение радиации надо проводить лишь на четырех-пяти длинах волн из диапазона на 304–332 нм. Время измерения на остальных, менее информативных длинах волн необходимо положить равным нулю. Оптимальные длины волн, а также распределение времени накопления сигнала между ними изменяются по мере изменения высоты Солнца z . Отметим, что относительное уменьшение погрешности восстановления, достигаемое за счет перехода к оптимально спланированному эксперименту, возрастает при уменьшении суммарного времени измерения.

Существенно то, что короткие длины волн от 290 до 302 нм ни при каких условиях не становятся оптимальными для измерений метода обращения из-за низкого отношения сигнал/шум даже для двойного монохроматора Brewer MKIII. Поэтому уменьшение систематических ошибок, вызываемых внутренним рассеянием в приборе, которое достигается при переходе от одиночного монохроматора Brewer MKII к двойному монохроматору Brewer MKIII, само по себе не позволяет перейти к измерениям на более коротких длинах волн, которые несут информацию о более высоких слоях озона. В то же время, исследование природы измерительного шума не являлось нашей задачей, и, следовательно, мы не можем разделить собственный шум атмосферы и шум измерительного тракта прибора. Если этот шум является характеристикой ФЭУ, то короткие длины волн могут стать оптимальными только после замены ФЭУ на лучший. Если же наблюдавшийся шум является типичным для атмосферы, то он устанавливает физические ограничения на возможности определения содержания озона в атмосфере методом обращения.

IV. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Пример восстановления профилей озона в численном эксперименте приведен на рис. 7. На рис. 7 истинный профиль озона был получен путем добавления косинусоиды с периодом 24 км к климатическому среднему зимнему профилю озона, рассчитанному для станции баллонного зондирования Хоэнпайсенберг [25] при ОСО, равном 345 е.Д. Амплитуда косинусоиды равнялась среднеквадратичным климатическим вариациям при этом значении ОСО. Наилучший результат восстановления дает ТИВС-алгоритм при описанном в разделе II.4 измерении на 8 длинах волн при 9 положениях Солнца. Соотношение между БММД-алгоритмом при том же измерении и ТИВС-алгоритмом, примененном к экспресс-измерению (23 длины волн, 1 угол z , см. раздел II.5), изменяется в

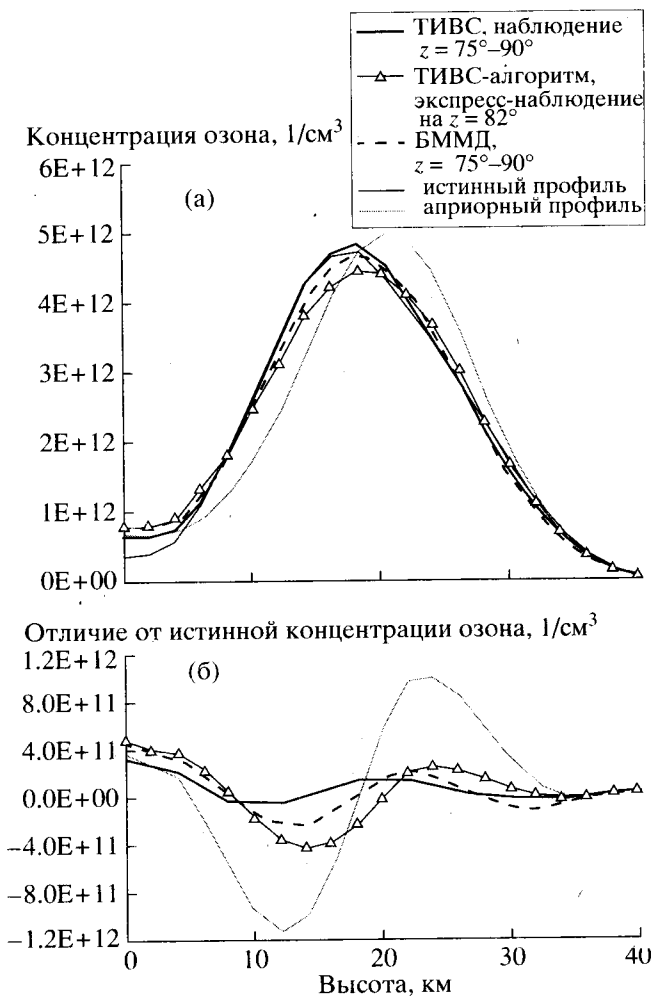


Рис. 7. а – результаты восстановления ВРО в численном эксперименте ТИВС- и БММД-методами при наблюдении от $z = 75^\circ$ до $z = 90^\circ$ и экспресс-наблюдениях при $z = 75^\circ$ и $z = 90^\circ$. Показаны также истинный и априорный профили. б – отличие априорного и восстановленных профилей, показанных на рис. 7а, от истинного профиля.

зависимости от истинного профиля и реализации шума измерения. Однако в среднем ошибки в этих двух случаях близки, если экспресс-измерения выполняются при $z > 82^\circ$. Таким образом, численные эксперименты подтверждают теоретические оценки точности восстановления.

Первые, предварительные результаты обработки натуральных экспериментальных данных приведены в работе [22]. Основные черты полученных профилей содержания озона хорошо согласуются с известными особенностями его распределения, типичными для аэрологических условий, в которых выполнялись наблюдения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено теоретическое исследование предельных возможностей по повышению точности определения озона по наблюдениям эффекта

обращения, т.е. по наблюдениям в УФ диапазоне с поверхности земли при низком положении Солнца. Исследованы как возможности улучшения алгоритма восстановления, так и возможности оптимизации процедуры измерения УФ излучения, наблюдаемые интенсивности которого являются исходными для расчета профилей содержания озона.

На основе теоретических исследований предложен новый метод восстановления ВРО по измерениям эффекта обращения на спектрофотометре Брюера. Ошибки восстановления новым методом меньше ошибок, характерных для стандартного метода, который был первоначально разработан для прибора Добсона и ныне используется на сети станций, оборудованных спектрофотометрами Брюера. Уменьшение погрешности достигает примерно двух раз в нижней стратосфере. Новый метод позволяет ограничиться 12-минутными экспресс-измерениями эффекта обращения, если условия наблюдений (например, разрывная облачность) не дают возможности вести непрерывные наблюдения по стандартной методике в течение 1.5–2 часов (а в полярных областях – 2–3 часов).

Рассмотрен вопрос о ценности измерений и построены карты ценности отдельных измерений в зависимости от зенитного угла Солнца и длины волны. Они позволяют выбрать положение Солнца и длины волн, измерения на которых являются наименее ценными с точки зрения достижения максимальной конечной точности восстановления ВРО. Такие измерения с наименьшими потерями (для точности определения ВРО) могут быть исключены из программы наблюдений эффекта обращения в тех случаях, когда исследователю требуется провести другие виды наблюдений на являющемся универсальным инструментом спектрофотометре Брюера.

Предложена схема оптимизации методики выполнения измерения эффекта обращения на основе решения задачи оптимального планирования эксперимента и перераспределения времен накопления сигнала между отдельными длинами волн. Показано, что за счет оптимизации методики наблюдений может быть достигнут дополнительный выигрыш в точности восстановления с типичными значениями до 10–25% среднеквадратичной погрешности измерения. При этом относительное уменьшение погрешности достигает тем больших значений, чем меньше суммарное время, выделяемое на наблюдения. Существенно то, что длины волн короче 302 нм ни при каких условиях не становятся оптимальными для измерений метода обращения из-за низкого отношения сигнал/шум даже для прибора Brewer MKIII, построенного по схеме двойного монохроматора.

Предлагаемые расширения метода обращения для измерения ВРО могут быть использованы на озонметрических станциях, оборудованных спектрофотометрами Брюера. Число таких станций в настоящее время около сотни. Возможность

проведения наблюдений в разрывах облачности и нестабильных аэрозольных условиях имеет принципиально важное значение, поскольку существенно увеличивает объем получаемых данных. Повышение точности восстановления в нижней стратосфере может сделать данные измерений метода обращения пригодными для анализа трендов в этой области. Новый метод позволит также чаще проводить измерение ВРО на полярных станциях, где применение стандартного метода значительную часть года невозможно из-за малых изменений положения Солнца над горизонтом. Все это делает метод весьма перспективным для использования на мировой озонметрической сети.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 95-05-15082 и № 98-05-64922.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Meteorological Organization. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. № 37. Geneva, 1995.
2. *Bojkov R.D., Fioletov V.E.* Estimating the global ozone characteristics during the last 30 years // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № D8. P. 16537–16551.
3. *Harris N.R.P., Ancelle G., Bishop L. et al.* Trends in stratospheric and free tropospheric ozone // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № D1. P. 1571–1590.
4. SPARC Newsletter № 7. Verriere-le-Buisson, July 1996. 32 p.
5. World Meteorological Organization. Atmospheric Ozone 1985. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report № 16. Geneva, 1985.
6. *Miller A.J. et al.* Comparisons of observed ozone trends in the stratosphere through examination of Umkehr and balloon ozonesonde data // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № D6. P. 11209–11217.
7. *Хргван А.Х.* Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 283 с.
8. *Gotz F.W.P.* Gerlands Beitrage zur Geophys. 1931. B. 31. Z. 119.
9. *Mateer C.L., Dütsch H.U.* Uniform evaluation of Umkehr observations from the world ozone network. Pt. 1. Proposed standard evaluation technique. Boulder, National Center for Atmospheric Research, 1964. 105 p.
10. *Козлов В.П.* Математические вопросы обращения радиационных данных // Инверсия Абеля. Новосибирск: Наука, 1978. С. 68–95.
11. *Покровский О.М., Кайгородцев Е.Е.* Информационное содержание дистанционных измерений озона в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 8. С. 866–875.
12. *Тимофеев Ю.М., Розанов В.В., Поберовский А.В.* Многоспектральный метод определения вертикальных профилей содержания O_3 , NO_2 и аэрозольного ослабления радиации в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1986. № 8. С. 66–73.
13. *Плохенко Ю.В., Успенский А.Б.* Алгоритмы учета внешних условий в задаче температурного зондирования атмосферы со спутников // Исследование Земли из космоса. 1987. № 5. С. 75–82.
14. *Козлов В.П.* Численное восстановление высотного профиля температуры по спектру уходящей радиации и оптимизация метода измерения // Изв.