

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Е. Зуев, Ю. С. Макушкин, В. Н. Маричев,
А. А. Мицель, И. В. Самохвалов, А. В. Соснин,
Лазерное зондирование профиля влажности атмосферы,
Докл. АН СССР, 1981, том 257, номер 6, 1338–1342

<https://www.mathnet.ru/dan44408>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.85

18 мая 2025 г., 19:33:42



Т а б л и ц а 4

Сильнейшие землетрясения 1977–1979 гг.

Дата	φ	M_{ω}	Дата	φ	M_{ω}
2 IV 1977	-16,7	7,6	5 XI 1978	-11,03	7,5
20 IV 1977	-9,84*	7,5	29 XI 1978	16,07	7,8
19 VIII 1977	-11,09	7,9	14 III 1979	17,8	7,6
12 VI 1978	38,4	7,5	12 IX 1979	-1,74*	8,1
16 IX 1978	33,21	7,7	12 XII 1979	1,58*	7,9

* Эпицентры, не лежащие на D -широтах.

продолжение своего каталога сильнейших землетрясений мира ⁽²⁾, охватывающее период с 1953 по 1977 г. В нем 17 землетрясений с $M_{\omega} \geq 8,0$. Из них 14 лежит на D -широтах порядка не выше 4 (вместо ожидаемых 6).

Указанная закономерность проявляется и в статистике более слабых землетрясений. За 1977–1979 гг. произошло 12 землетрясений с $M_S \geq 7,5$ (согласно ⁽³⁾). Из них 9 лежат на D -широтах порядка не выше 4 (табл. 4).

Приведенные факты говорят о соответствии выводов из гипотезы о D -волнах реальной картине сейсмичности Земли.

Автор искренне благодарит В.И. Кейлис-Борока и М.Г. Шнирманна за полезное обсуждение и тонкие замечания.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Академии наук СССР, Москва

Поступило
12 XI 1980

ЛИТЕРАТУРА

¹ Ш.А. Губерман, Вычислит. сейсмол., в. 12, 158 (1979). ² Н. Kanamori, J. Geophys. Res., v. 82, № 20 (1977). ³ Preliminary Determination of Epicenters. US Department of the Interior, Geological Survey, 1978–1979. ⁴ К. Abe, Н. Kanamori, Tectonophysics, v. 62, 191 (1980).

УДК 551.508.769

ГЕОФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР В.Е. ЗУЕВ, Ю.С. МАКУШКИН,
В.Н. МАРИЧЕВ, А.А. МИЦЕЛЬ, И.В. САМОХВАЛОВ, А.В. СОСНИН

ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Для исследования физических свойств атмосферы и решения ряда прикладных задач, связанных с прогнозом погоды, необходима оперативная информация о пространственно-временном распределении водяного пара в атмосфере. Одним из наиболее перспективных методов дистанционного определения газовой структуры атмосферы, включая ее влажность, является метод лазерного зондирования, основанный на явлениях рассеяния и резонансного поглощения излучения. При практической реализации метода возникает ряд сложных методических и технических проблем, которые в комплексе решены в настоящей работе, а именно:

- 1) выбран информативный и оптимальный с точки зрения энергетического потенциала лидара спектральный участок, доступный для аппаратурного освоения;
- 2) исследована эволюция контура рабочей линии поглощения молекул H_2O для условий реальной атмосферы ⁽¹⁾;
- 3) разработан эффективный алгоритм интерпретации экспериментальных данных с использованием сглаживающих сплайнов;
- 4) создан оригинальный комплекс аппаратуры и разработана методика зондирования.

Отметим главные особенности применяемого лидара ⁽²⁾. В нем в качестве передатчика использовался лазер на рубине с модуляцией добротности, в котором спектральная селекция и перестройка длины волны излучения осуществлялась резонансным рефлектором ⁽³⁾. Для контроля длины волны впервые в лидарной системе использовался спектрофон ⁽⁴⁾. Запись информации (электрических сигналов с ФЭУ) осуществлялась регистратором лидарных сигналов (РЛС), работающим в режимах приема токового сигнала и счета фотоимпульсов ⁽⁵⁾. С РЛС информация могла выводиться на цифропечать, перфоратор или поступать в ЭВМ для предварительной экспресс-обработки лидарных данных. В целом по совокупности параметров, особенно спектральных характеристик передатчика, лидар является уникальным и выгодно отличается от известных лидаров.

Метод зондирования водяного пара основан на использовании двух физических эффектов взаимодействия излучения со средой: рассеяния и поглощения. Благодаря первому эффекту формируются сигналы обратного рассеяния, мощность которых зависит от рассеивающих и поглощающих свойств атмосферы:

$$(1) \quad P(\lambda_i, R) = P_0(\lambda_i) \frac{c\tau}{2} \frac{AF(r)}{R^2} \beta_\pi(\lambda_i, R) \exp \left\{ -2 \int_0^R \alpha(\lambda_i, R) dR \right\} \times \\ \times \exp \left\{ -2 \int_0^R k(\lambda_i, R) \rho(R) dR \right\}; \quad U(\lambda_i, R) = \kappa(\lambda_i) P(\lambda_i, R),$$

где λ_i — длина волны излучения зондирующего импульса; $P(\lambda_i, R)$ — мощность принимаемого с расстояния R эхо-сигнала; c — скорость света; τ — длительность импульса; $P_0(\lambda_i)$ — мощность импульса; A — площадь приемной антенны; $F(r)$ — геометрический фактор; $\alpha(\lambda_i, R)$, $\beta_\pi(\lambda_i, R)$ — коэффициенты полного и обратного рассеяния света; $k(\lambda_i, R)$ — массовый коэффициент поглощения H_2O (м.к.п.); $\rho(R)$ — абсолютная влажность атмосферы; $U(\lambda_i, R)$ — электрический сигнал, снимаемый с выхода фотоприемника; $\kappa(\lambda_i)$ — спектральная чувствительность приемника. Выражение (1) записано для квазимонохроматического излучения.

Извлечение информации о пространственном распределении концентрации водяного пара осуществляется путем зондирования на двух длинах волн λ_1 и λ_2 (в линии и вне линии поглощения). Получаемая при этом система двух уравнений типа (1) легко решается относительно абсолютной влажности $\rho(R)$ в предположении неизменности рассеивающих свойств среды за время Δt между двумя актами зондирования ($\Delta t < 10^{-3}$ с ⁽⁶⁾):

$$(2) \quad \rho(R) = \frac{1}{2k(R)} \frac{d}{dR} \ln \frac{U(\lambda_2, R)}{U(\lambda_1, R)}.$$

В описываемом эксперименте вследствие низкой частоты посылок импульсов лазера время Δt было равно 5–6 с. Поэтому для исключения ошибок, связанных с нестабильностью рассеивающих свойств атмосферы, использовалась методика накопления сигнала ⁽²⁾. Согласно данной методике дисперсию ошибки измерения ξ функции

$$(3) \quad \tilde{U}(R) = \frac{1}{2} \ln \{ U(\lambda_2, R) / U(\lambda_1, R) \} = U(R) + \xi$$

в токовом режиме работы РЛС можно представить как

$$(4) \quad \sigma_{\xi}^2(R_i) = \frac{1}{4n} \left\{ \frac{\delta^2}{\bar{U}^2(\lambda_1, R_i)} + \frac{\delta^2}{\bar{U}^2(\lambda_2, R_i)} + \left(\frac{\sigma_{\beta}}{\beta_{\pi}} \right)^2 \right\},$$

где δ — ошибка оцифровки регистратора; $\bar{U}(\lambda_{1,2}, R)$ — среднее значение сигнала в i -м канале регистратора; n — число измерений. В выражении (4) не учитывается погрешность, связанная с флуктуациями τ_p , так как последней можно пренебречь.

Для сигналов, полученных в режиме счета фотонов, дисперсия ошибки измерения сигнала в i -м канале регистратора имеет вид

$$(5) \quad \sigma_{\xi}^2(\Delta R_i) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \frac{1}{n(\lambda_j, \Delta R_i)},$$

где $n(\lambda_j, \Delta R_i)$ — число фотоотсчетов в i -м канале регистратора, зарегистрированных на длине волны λ_j .

В математическом отношении определение профиля влажности сводится к дифференцированию измеренной на некоторой сетке $a = R_1 < R_2 < \dots < R_n = b$ функции $\tilde{U}(R)$ (см. выражение (2), (3)), где a, b — нижняя и верхняя границы зондируемого слоя атмосферы. Поскольку задача дифференцирования некорректна, то использование разностной схемы для вычисления

$$(6) \quad \rho(R) = \frac{1}{\Delta R k(R)} [\tilde{U}(R + \Delta R) - \tilde{U}(R)]$$

может привести к большим ошибкам определения $\rho(R)$.

Для устойчивого вычисления $\rho(R)$ нами был использован метод на основе дифференцирования сглаживающего кубического сплайна, построенного по значениям $\tilde{U}(R_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Дифференцируя кубический сплайн $S_{n,\gamma}(R)$, построенный по $\tilde{U}(R_i)$, величину влажности $\rho(R_i)$ в узлах, R_i удастся определить соотношением

$$\rho(R_i) = \frac{1}{k(R_i)} S'_{n,\gamma}(R_i) = \frac{1}{k(R_i)} b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1,$$

$$\rho(R_n) = \frac{1}{k(R_n)} \left[b(R_{n-1}) + \frac{h_{n-1} M_{n-1}}{2} \right],$$

где $M_i = S''_{n,\gamma}(R_i)$; b_i — коэффициенты сплайна, определяемые через значения вторых производных $S''_{n,\gamma}(R_i)$ (7); γ — параметр сглаживания.

Выбор параметра сглаживания осуществлялся по одному из описанных в (8, 9) алгоритмов.

Вопрос о точности и достоверности извлекаемой из эксперимента информации является не менее важным, чем получение самой информации. В работе (10) были получены соотношения, позволяющие вычислять ошибку дифференцирования сглаживающих кубических сплайнов, обусловленную как случайным характером изменения величин ξ (см. (3)), так и систематическим смещением. Приведем лишь окончательные выражения для влажности и ошибки определения последней:

$$\rho(R_i) = \frac{1}{k(R_i)} [b_i - B_b(i)],$$

$$\sigma_{\rho}(R_i) = \frac{1}{k(\rho_i)} \sqrt{D[\xi_b(i)]},$$

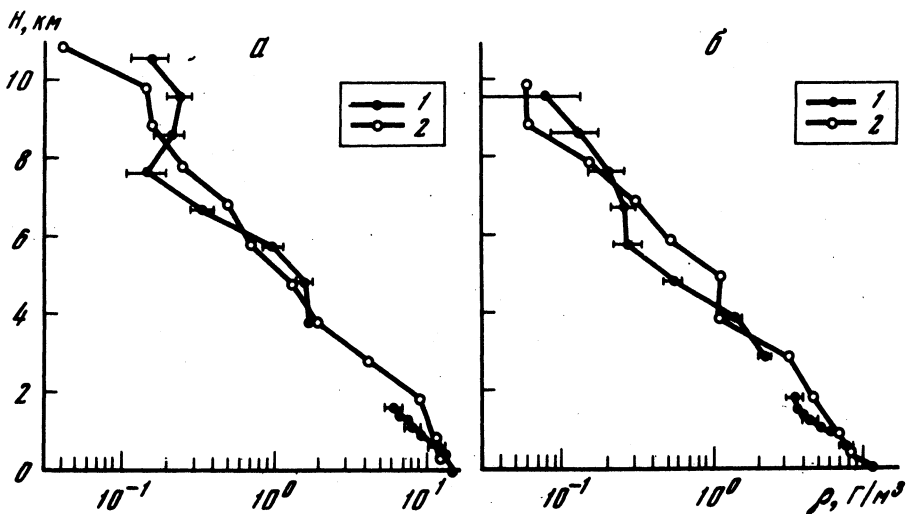


Рис. 1. Вертикальные профили влажности 30 (а) и 31 июля 1978 г. (б): 1 – лидарный, 2 – радиозондовый

где $B_b(i)$ – смещение в узле R_i (более подробно см. в (1^0)), $\xi_b(i)$ – случайная составляющая ошибки определения коэффициента b_i в узле R_i ; $D[x]$ – дисперсия величины x .

Некоторые результаты лидарного зондирования абсолютной влажности тропосферы, полученные в районе Томска летом 1978 г. в ночное время в условиях устойчивого антициклона, приведены на рис. 1 (кривые 1). Здесь же для сравнения нанесены радиозондовые профили влажности (кривые 2).

Таким образом, результаты, полученные независимыми способами, удовлетворительно согласуются между собой. Прослеживаемая по полученным графикам тенденция экспоненциального убывания концентрации водяного пара с высотой согласуется с некоторыми моделями влажности атмосферы, приведенными в (1^1) . Среднеквадратические ошибки измерений профилей $\rho(H)$ относительно невелики, что говорит о достаточно высокой точности лидарного определения влажности до высот 9–10 км. В эксперименте были получены профили влажности до высоты 17 км, однако ошибка восстановления в них для высот $H > 10$ км достигала или даже превосходила значения измеряемой величины, что является следствием малых концентраций водяного пара на этих высотах. Тем не менее, и при таком уровне ошибок лидарные профили были близки к радиозондовым. При этом задача уменьшения ошибок восстановления вполне решается за счет увеличения объема выборки эхосигналов, повышения энергетического потенциала передатчика и чувствительности лидара.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. Лидарный метод обеспечивает по сравнению с радиозондовым высокое пространственное разрешение и достаточную точность измерений; позволяет получать более оперативную информацию о влажности, что важно в исследованиях динамики процессов, определяющих перенос водяного пара в пограничном слое атмосферы; дает возможность определять распределение влажности во всей толще тропосферы и нижней стратосферы.

ЛИТЕРАТУРА

¹ О.К. Войцеховская, Ю.С. Макушкин и др., Изв. высш. учебн. завед. Физика, № 1, 62 (1977). ² В.Н. Маричев, В кн.: Зондирование физико-химических параметров атмосферы с использованием мощных лазеров, Томск, 1979, стр. 150. ³ В.Н. Маричев, Н.В. Неделькин, А.В. Соснин, Изв. высш. учебн. завед., Физика, № 5, 112 (1980). ⁴ В.Н. Маричев, И.В. Самохвалов, А.В. Соснин, В сб.: Вопросы дистанционного зондирования атмосферы, Томск, 1975, стр. 126. ⁵ М.И. Демчук, В.П. Кузнецов и др., В сб.: Тез. докл. IV Всесоюзн. симп. по распространению лазерного излучения в атмосфере, Томск, 1977, стр. 51. ⁶ R.M. Schotland, J. Appl. Meteorol., v. 13, 71 (1974). ⁷ С.Б. Стечкин, Ю.Н. Субботин, Сплайны в вычислительной математике, М., "Наука", 1976, стр. 240. ⁸ Ю.Е. Воскобойников, В сб.: Алгоритмы и средства автоматизации теплофизического эксперимента, Новосибирск, 1978, стр. 46. ⁹ Ю.Е. Воскобойников, там же, стр. 46. ¹⁰ Ю.Е. Воскобойников, А.А. Мицель, В сб.: Тез. док. V Всесоюзн. симп. по распространению лазерного излучения в атмосфере, Томск, ч. 3, 1979, стр. 187. ¹¹ Справочник статистических характеристик температуры и влажности в свободной атмосфере над СССР, М., Гидрометеоздат, 1972.

УДК 551.509.314

ГЕОФИЗИКА

В.Е. ПРИВАЛЬСКИЙ

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ СРЕДНЕЙ ГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

(Представлено академиком А.М. Обуховым 30 X 1980)

Изучение предсказуемости климата составляет сейчас одну из основных задач физической климатологии (¹, ²). Особенный интерес в этом отношении представляет естественная междугодичная изменчивость, которая определяет вариации климата в пределах жизни одного поколения или срока службы инженерных сооружений. Процессы с такими временными масштабами можно отнести к "внутриклиматической изменчивости" (³).

В настоящей работе предпринята попытка оценить статистическую предсказуемость и временной спектр средней годовой температуры воздуха в северном полушарии непосредственно по данным многолетних наблюдений над температурой в приземном слое. Исходные ряды представляют собой средние годовые значения температуры воздуха, осредненной внутри пятиградусных широтных зон с северными границами от 15° до 90° с.ш. Длина рядов составляет 86 лет — с 1891 г. по 1976 г. (³). Анализ выполнен с помощью метода наибольшей энтропии (⁴⁻⁶). Такой подход дает статистически приемлемые результаты и позволяет одновременно оценить спектр температуры и осуществить ее оптимальный линейный прогноз.

Статистическая предсказуемость и спектр крупномасштабных атмосферных процессов изучались ранее при помощи параметрических методов, главным образом, по данным наблюдений в отдельных точках (⁷, ⁸). Основные выводы этих работ сводятся к следующему: а) спектр атмосферных процессов медленно убывает с частотой и не содержит статистически значимых максимумов (см. также (⁹, ¹⁰)); б) пределы статистической предсказуемости не превышают одного года; в) хорошим приближением для рассмотренных временных рядов служит простая марковская последовательность с небольшим (как правило, порядка 0,1) параметром регрессии. Эти выводы находятся в согласии со стохастической моделью климата (¹¹). В насто-