

УДК 551.501:551.510

## Оценка погрешностей и верификация метода флюид-локации атмосферы

В.А. Поддубный, Е.С. Наговицына\*

*Институт промышленной экологии УрО РАН  
620219, г. Екатеринбург, ГСП-594, ул. Софьи Ковалевской, 20а*

Поступила в редакцию 11.03.2014 г.

Предложен вариант определения погрешностей статистической оценки среднего эффективного поля концентрации, рассчитанного в квазидвумерном приближении методом флюид-локации атмосферы (ФЛА). Представлены результаты верификации метода ФЛА тремя способами. Несмотря на то что квазидвумерное приближение имеет ряд ограничений, все рассмотренные способы верификации указывают на возможность использования метода ФЛА для оценки средних полей концентраций тонкодисперсного аэрозоля.

*Ключевые слова:* верификация, обратные траектории, атмосферный аэрозоль; verification, back trajectories, atmospheric aerosol.

### Введение

В настоящее время для интерпретации результатов исследований в самых разных областях физики атмосферы широко применяется визуальный анализ траекторий движения воздушных частиц. Очень часто результаты измерений содержания в атмосфере газовых и аэрозольных примесей сопоставляются с траекториями движения воздуха для выяснения происхождения, возможных источников и объяснения тех или иных характеристик загрязняющих веществ в разные периоды времени.

При постановке задачи и проведении прямого численного моделирования переноса и рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере обязательно требуется задание параметров источников эмиссии газовых и/или аэрозольных примесей в атмосферу (см., например, [1, 2]). В альтернативном подходе, предложенном в работах [3–5], развиваются методы статистики обратных траекторий (COT), в которых для оценки пространственной структуры полей загрязнения атмосферы не требуется задавать параметры источников поступления примесей в атмосферу. Вместо этого в качестве исходной информации используется множество результатов измерений концентраций загрязняющих веществ в атмосфере в одном или нескольких пунктах мониторинга.

Основным недостатком методов COT является сложность или невозможность учета физико-химических трансформаций, происходящих с примесью в атмосфере по мере движения воздушных частиц. В работах [6, 7] был предложен новый вариант метода COT – метод флюид-локации атмосферы (ФЛА),

в котором перераспределение измеренного прибором сигнала (концентрации примеси в атмосфере) вдоль траекторий движения воздушных частиц рассчитывается на основе решения уравнений сохранения. Таким образом, в методе ФЛА помимо применения процедур статистического усреднения решаются уравнения переноса примеси в атмосфере, что позволяет, в случае необходимости, учитывать значимые физико-химические процессы, происходящие в атмосфере. Метод ФЛА является статистико-гидродинамическим вариантом методов COT. В методе ФЛА вводятся определения новых функций: «среднего эффективного поля концентрации» и «среднего эффективного поля источников/стоков», которые статистически связаны с полем концентраций примеси в атмосфере и с распределением в пространстве источников/стоков примеси. В связи с тем что в любом из методов COT, включая метод ФЛА, ищется не поле усредненной концентрации, а некоторая вновь заданная функция, то исключительно важной становится задача верификации соответствующего метода и результатов, полученных с его помощью.

### Общая постановка задачи

Анализируются результаты решения задачи восстановления среднего эффективного поля мелкодисперсного аэрозоля в квазидвумерном приближении. Подробное описание физико-математических основ и алгоритма численных расчетов метода ФЛА представлено в работах [8, 9]. В качестве исходных данных использовались объемные концентрации мелкодисперсного (радиусы частиц от 0,05 до 0,76 мкм) аэрозоля в столбе атмосферы, восстановленные из концентраций, полученных в результате фотометрических измерений в шести пунктах аэрозольно-оптического

\* Василий Алексеевич Поддубный (Basil@ecko.uran.ru);  
Екатерина Сергеевна Наговицына (EkaterinaN@ecko.uran.ru).

мониторинга глобальной сети AERONET (URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), расположенных на территории России: Звенигород, Москва, Екатеринбург, Томск, Якутск, Уссурийск [10, 11]. Использовались данные измерений уровня 1.5 (по классификации AERONET), что обеспечило учет различных состояний атмосферы с высокими (аэрозольная оптическая толщина на длине волны 0,44 мкм больше 0,4) и низкими уровнями замутненности.

Для удобства анализа все концентрации нормированы на характерное значение объемной концентрации мелкодисперсного аэрозоля. В качестве такого масштаба концентраций выбрано медианное значение выборки результатов наблюдений в Екатеринбурге за 2004–2010 гг., равное 0,025 мкм<sup>3</sup>/мкм<sup>2</sup>.

При решении задачи восстановления пространственного распределения мелкодисперсного аэрозоля для учета динамических процессов в атмосфере использовались семисуточные обратные траектории воздушных частиц, начинающиеся в перечисленных выше пунктах мониторинга на изобарической поверхности 950 гПа, рассчитанные Т. Кучерой и представленные на сайте НАСА (URL: <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/>). Высота старта обратных траекторий составляет около 500 м, т.е. лежит внутри пограничного слоя атмосферы. Как показано в экспериментальных исследованиях [12, 13], объемная концентрация аэрозоля в этом слое атмосферы максимальна в связи с тем, что в анализируемом регионе основные источники аэрозоля антропогенного и природного происхождения расположены в приземном слое атмосферы. В то же время при анализе представленных ниже результатов следует помнить об ограниченности такого квазидвумерного подхода, который не учитывает реальное распределение аэрозоля по высоте и изменение модуля и направления скорости ветра с высотой.

Период моделирования методом ФЛА, за который проводилось усреднение, составил 7 лет (с 2004 по 2010 г.) для всех станций мониторинга, кроме Звенигорода. Период моделирования для ст. Звенигород начинается с 2006 г. Задача одновременной обработки данных измерений всех указанных пунктов мониторинга решается в области пространства от 30 до 70° с.ш. и от 0 до 150° в.д. Вся расчетная область разбивается на ячейки размерами 1 × 1°.

В ходе моделирования методом ФЛА рассчитывалось пространственное распределение [8, 9]:

$$\bar{C}_{ij} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{T_{ij}} \left( \sum_l \int C_l dt \right)_{ij} \approx \left( \frac{1}{\sum_l \tau_l} \sum_l \sum_{k_l} C_{k_l} \Delta t_{k_l} \right)_{ij}, \quad (1)$$

где  $\bar{C}_{ij}$  – среднее эффективное поле концентрации мелкодисперсного аэрозоля; индексы  $i, j$  идентифицируют эйлерову ячейку пространства (решается квазидвухмерная задача);  $T_{ij}$  – полное время нахождения всех воздушных частиц (лагранжевых частиц) в объеме эйлеровой ячейки  $(i, j)$ ;  $C_l$  – концентрация примеси, изменяющаяся вдоль траектории с номером  $l$ , а суммирование по  $l$  означает суммирование (перебор) по всем траекториям движения

лагранжевых частиц, проходящих через анализируемую эйлерову ячейку пространства;  $t$  – время, переменная интегрирования вдоль траекторий движения лагранжевых частиц; интегрирование выполняется по отрезку времени, в течение которого лагранжева частица  $l$  находится внутри соответствующей эйлеровой ячейки  $(i, j)$ ;  $\tau_l$  – время нахождения  $l$ -й лагранжевой частицы в объеме эйлеровой ячейки  $(i, j)$ ; индекс  $k_l$  – номер точки  $k$  на траектории  $l$  внутри соответствующей эйлеровой ячейки  $(i, j)$ , а суммирование по  $k_l$  означает суммирование по всем точкам траектории  $l$  внутри анализируемой эйлеровой ячейки;  $\Delta t_{k_l}$  – шаг по времени между соседними точками на траектории  $l$  (при расчете траекторий был принят постоянным и равным 15 мин).

В методе ФЛА концентрации примеси изменяются вдоль траектории, в то время как в традиционных методах СОТ (исключая метод А. Stohl [5]) они остаются постоянными и равными концентрации в момент измерения. Это означает, что в формуле (1) величина  $C_l$  (или в разностной форме  $C_{k_l}$ ) есть неизвестная функция, которая находится в результате решения задачи методом ФЛА.

Согласно методу ФЛА [8] одновременно со средним эффективным полем концентрации примеси рассчитывается и среднее эффективное поле источников/стоков примеси. Однако в настоящей статье анализируются лишь результаты расчетов концентраций, так как для контроля местоположения и мощностей эмиссии источников примеси (аэрозоля) в атмосферу необходимы другие подходы, что составляет тему отдельного исследования. Поэтому далее среднее эффективное поле источников/стоков примеси в атмосферу не обсуждается, хотя следует заметить, что эта функция является неотъемлемой и важной частью решения задачи методом ФЛА.

## Расчет погрешностей статистической оценки поля средних концентраций

К возникновению погрешностей при оценке средних значений концентраций приводит переход в формуле (1) от интеграла по времени к расчету конечной суммы. В то время как интеграл в левой части формулы (1) является точным определением средней величины концентрации, учитывающим все лагранжевы частицы в расчетной ячейке пространства, конечная сумма в правой части (которая используется при выполнении приближенных численных расчетов) учитывает при оценке средней величины только конечное число лагранжевых частиц – обратных траекторий, пришедших в расчетную ячейку от конечного числа точек, где выполнялись измерения. Это означает следующее. Во-первых, левая (определение среднего) и правая (приближенная расчетная формула) части формулы (1) соотносятся как среднее по генеральной совокупности и среднее, рассчитанное по выборке конечных размеров. Во-вторых, в силу разной плотности числа обратных траекторий в различных областях пространства погрешности расчета среднего по формуле (1)

будут различными. По мере удаления от точек мониторинга, т.е. от точек старта траекторий, плотность числа обратных траекторий уменьшается, а погрешности расчета средних величин возрастают. Именно погрешности, обусловленные различным числом траекторий движения воздушных частиц в различных расчетных ячейках, будут проанализированы далее.

Рассмотрим некоторую ячейку  $(i, j)$  пространства, через которую прошло  $N$  траекторий. Полагаем, что в каждой точке траекторий концентрации известны, могут быть вычислены. Так как значения концентраций вдоль одной траектории нельзя считать независимыми, то в дальнейшем анализе будем использовать средние значения концентраций вдоль каждой траектории в расчетной ячейке вида

$\bar{C}_l = \frac{1}{n_l} \sum_{k_l} C_{k_l}$ , где  $n_l$  – число точек траектории  $l$  внутри ячейки  $(i, j)$ .

Далее предположим, что множество средних за небольшой интервал времени значений концентраций примеси в каждой точке пространства подчиняется логнормальному закону распределения. Это допущение физически вполне оправданно, так как статистический анализ результатов измерений, усредненных за час, выполненный с использованием критерия Пирсона, показывает, что при уровне значимости 0,05 логарифмы объемных концентраций тонкодисперсной фракции аэрозоля в точке проведения измерений (в Екатеринбурге) подчиняются нормальному закону распределения. Аналогичный анализ проводился и в других пунктах мониторинга атмосферного аэрозоля (см., например, [9]).

В ячейках пространства, через которые прошло достаточно много траекторий (объем выборки больше 100 траекторий), оценка двустороннего 90%-го доверительного интервала для математического ожидания может выполняться по формуле [14]:

$$\bar{C} - Z_{0,95} \frac{s^*}{\sqrt{N}} < \mu < \bar{C} + Z_{0,95} \frac{s^*}{\sqrt{N}}, \quad (2)$$

где  $\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \bar{C}_l$  – выборочное среднее значение концентрации мелкодисперсного аэрозоля в текущей ячейке;  $Z_{0,95} \approx 1,6$  – 95%-й квантиль стандартного нормального распределения;  $\mu$  – математическое ожидание средних по траекториям концентраций;  $s^*$  – исправленная выборочная оценка среднеквадратического отклонения средних по траекториям концентраций.

В случае небольшой выборки логнормально распределенных концентраций для оценки двустороннего 90%-го доверительного интервала математического ожидания используется формула [15]:

$$\exp\left(\mu_{Ln}^* + 0,5s_{Ln}^{*2} + \frac{s_{Ln}^* H_{0,95}}{\sqrt{N-1}}\right) < \mu < \\ < \exp\left(\mu_{Ln}^* + 0,5s_{Ln}^{*2} + \frac{s_{Ln}^* H_{0,05}}{\sqrt{N-1}}\right),$$

$$\mu_{Ln}^* = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \ln \bar{C}_l, \quad s_{Ln}^* = \left( \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^N (\ln \bar{C}_l - \mu_{Ln}^*)^2 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\mu_{Ln}^*$  – выборочная оценка средней величины логарифмов концентраций;  $s_{Ln}^{*2}$  – исправленная выборочная оценка среднеквадратического отклонения логарифмов концентраций;  $H_{0,95}$  и  $H_{0,05}$  – табулированные величины [14], которые зависят от  $s_{Ln}^*$  и  $N$ .

Неравенства (2) и (3) позволяют в каждой расчетной ячейке оценить погрешности определения среднего эффективного поля концентрации примеси методом ФЛА, связанные с использованием усреднения по формуле (1).

В работе [16] было введено понятие зоны влияния на измерительный прибор, т.е. такой области пространства, в которой какое-либо событие, связанное с загрязнением атмосферы, потенциально может быть зарегистрировано в точке размещения прибора через указанное время. В настоящей статье зона влияния на прибор определялась как область пространства, ограниченная изолинией поля плотности числа траекторий со значением, равным единице (вне этой области траекторий нет).

Области пространства, в которых плотность числа траекторий достаточно велика и позволяет выполнять содержательный анализ получаемых средних полей концентраций, рассматриваются далее как зоны моделирования. В настоящей статье область моделирования определялась как область пространства, в которой относительная погрешность определения среднего значения концентрации, найденная с помощью формул (2) и (3), не превышает 30%. В области пространства внутри зоны влияния, но вне области моделирования, результаты расчетов методом ФЛА следует считать малодостоверными. Области пересечения зон моделирования различных станций мониторинга далее называются зонами контроля, поскольку в таких областях пространства можно проводить сравнение результатов модельных расчетов полей концентраций, восстановленных по независимым рядам измерений, выполненных на таких станциях.

На рис. 1, а показано поле распределения плотности числа обратных траекторий движения воздушных частиц. Область пространства, обозначенная двойной штриховкой, соответствует территории, не попавшей в общую зону влияния, т.е. территории, с которой в пункты мониторинга не пришло ни одной траектории движения воздушных частиц за весь период измерений (2004–2010 гг.). На рис. 1, б показаны области, в которых относительная погрешность оценки средней концентрации аэрозоля, рассчитанная путем деления неравенств (2) и (3) на  $\bar{C}$ , не превышает 10, 20 и 30%. Жирной линией на рис. 1 отмечена изолиния  $n_{tr} = 10$ , соответствующая 10 траекториям на расчетную ячейку, штриховой – изолиния  $n_{tr} = 20$ . Из рис. 1, б видно, что изолиния  $n_{tr} = 20$  хорошо соответствует области пространства, в которой относительная погрешность определения средней величины концентрации аэрозоля не превышает 30%. Это означает, что в рассмотренной

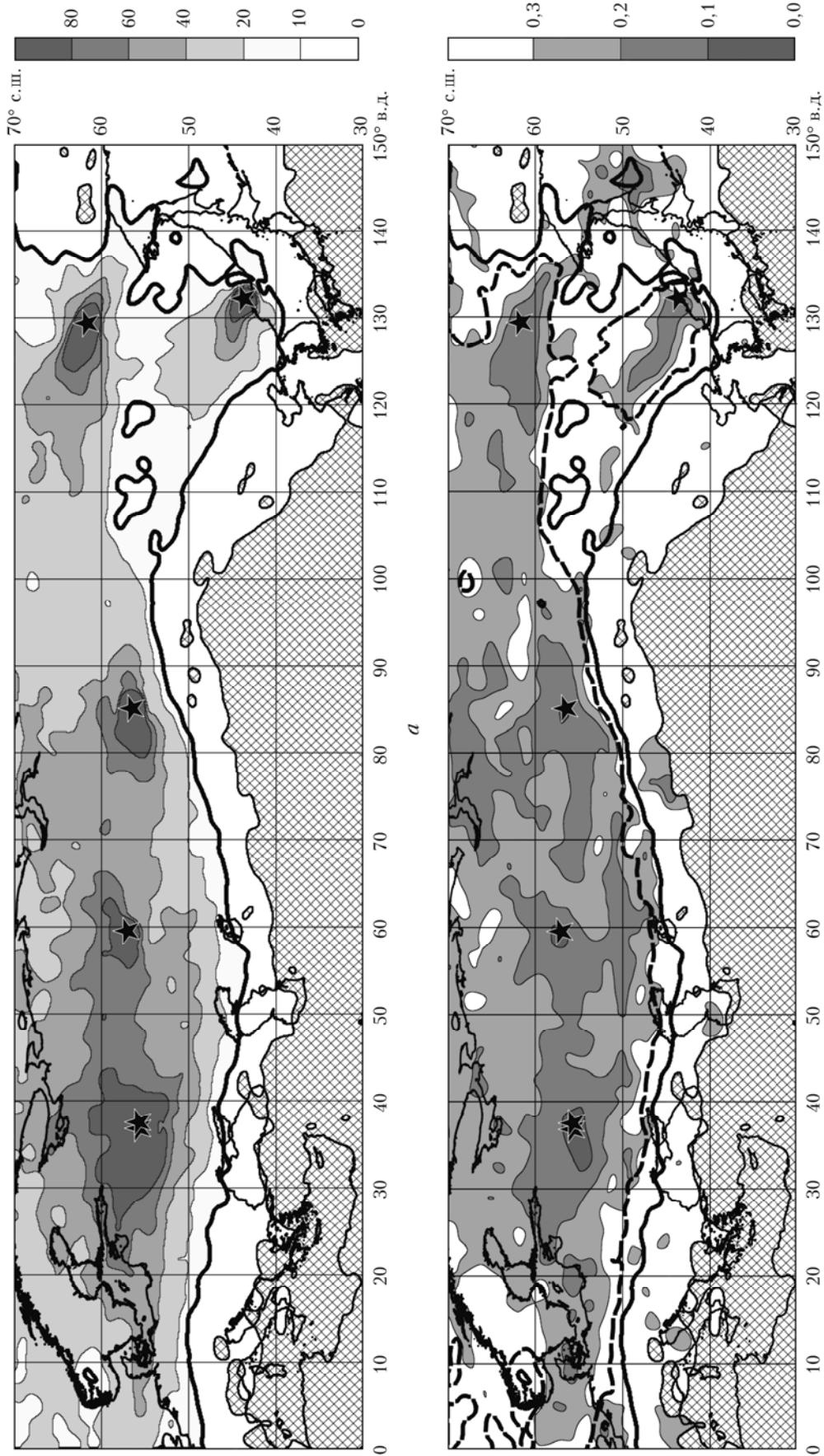


Рис. 1. Область моделирования: *а* – пространственное распределение плотности числа обратных траекторий; *б* – пространственное распределение относительных погрешностей средних концентраций, рассчитанных с помощью формул (2) и (3). «Звездочка» – пункты мониторинга AERONET (слева направо: Звенигород, Москва, Екатеринбург, Томск, Якутск, Уссурийск)

задаче в качестве границы зоны достоверного моделирования можно использовать указанную изолинию  $n_{tr} = 20$ . Дополнительный анализ показал, что изолиния  $n_{tr} = 10$  достаточно точно соответствует области пространства, в которой относительная погрешность определения медианы концентрации аэрозоля не превышает 30%.

Особенностью рассчитанного пространственного распределения погрешностей определения средних концентраций (см. рис. 1, б) является то, что области пространства с 20- и 30%-ми относительными погрешностями охватывают очень большую часть территории. Таким образом, использование метода ФЛА для обработки результатов аэрозольных измерений позволяет оценивать поле средних концентраций (путем расчета среднего эффективного поля концентраций) в точках, удаленных от пункта мониторинга на расстояния, превышающие 1000 км. Применение метода ФЛА к анализу данных измерений всего шести пунктов мониторинга позволяет выполнить оценку распределения мелкодисперсного аэрозоля в атмосфере почти над всей территорией страны.

Следует отметить, что приведенные выше оценки погрешностей относятся только к операции усреднения при нахождении среднего эффективного поля концентраций. Информацию о степени достоверности получаемых с помощью метода ФЛА результатов и их суммарных погрешностях дает сравнение результатов моделирования с данными независимых измерений.

### **Сравнение результатов моделирования с измерениями в контрольных точках**

Метод ФЛА позволяет на основе измерений, выполненных даже в одном отдельном пункте мониторинга, восстанавливать пространственную структуру загрязнения атмосферы. Поэтому если в зону моделирования (см. выше), определенную по результатам измерений в некоторой точке аэрозольных наблюдений, попадает другой независимый пункт мониторинга, то появляется возможность сравнить результаты моделирования и измерений. В российском сегменте сети AERONET в зоны моделирования для Томска, Москвы, Звенигорода попадают станции мониторинга Екатеринбург, Звенигород и Москва соответственно. Для каждого из этих пунктов мониторинга методом ФЛА была решена отдельная задача восстановления среднего эффективного поля концентрации. Нормированная средняя концентрация мелкодисперсного аэрозоля в Екатеринбурге, рассчитанная по данным измерений в Томске, равна 1,6, в то время как измерения в Екатеринбурге дают значение 1,4 (различие 14%). Расчет в Звенигороде по данным Москвы дает концентрацию 1,5, а измерения в самом Звенигороде – 1,7 (различие 12%). Расчет в Москве по данным Звенигорода дает концентрацию 2,0, а измерения в точке мониторинга, расположенной в Москве, – 1,7 (различие 18%).

Таким образом, прямые измерения объемных концентраций аэрозоля и результаты моделирования на основе наблюдений в удаленной точке отличаются менее чем на 20%, что говорит о хорошем соответствии рассчитанных с помощью метода ФЛА концентраций аэрозоля реально наблюдаемым. Из этих результатов следует, что величина среднего эффективного поля концентрации, рассчитанная с помощью усреднения вида (1), при достаточном количестве измерений и обратных траекторий является хорошим приближением к средней концентрации примеси.

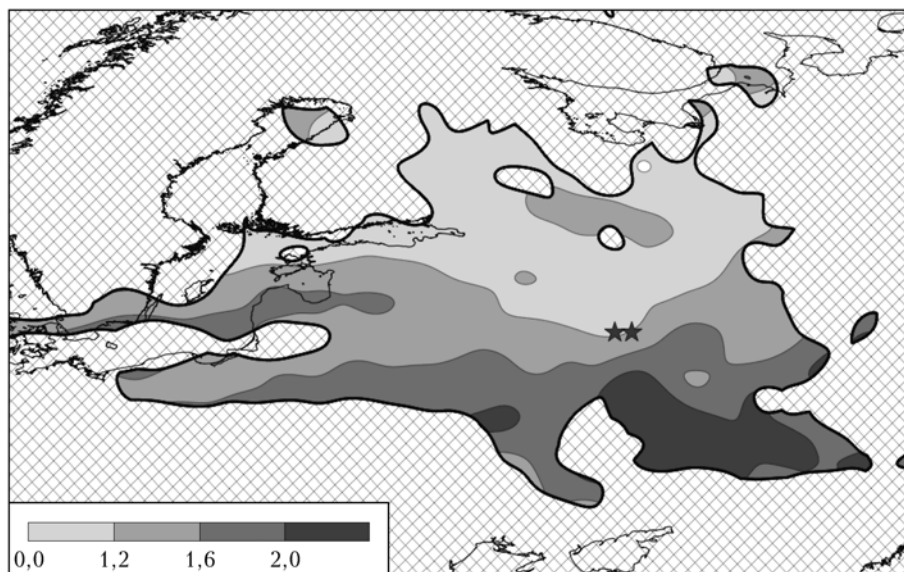
### **Сравнение пространственных распределений полей в контрольных зонах**

Как отмечалось выше, зоны моделирования двух станций мониторинга могут формировать зону контроля. В зоне контроля по результатам решения двух задач обработки данных независимых пунктов мониторинга методом ФЛА имеются два поля концентраций. В настоящей статье сравнение пространственных полей в зоне контроля выполнено путем сопоставления основных статистических характеристик двух полей распределений концентраций, а также с помощью анализа статистических характеристик «поля различий» (т.е. разницы между средними эффективными полями концентраций в каждой расчетной ячейке).

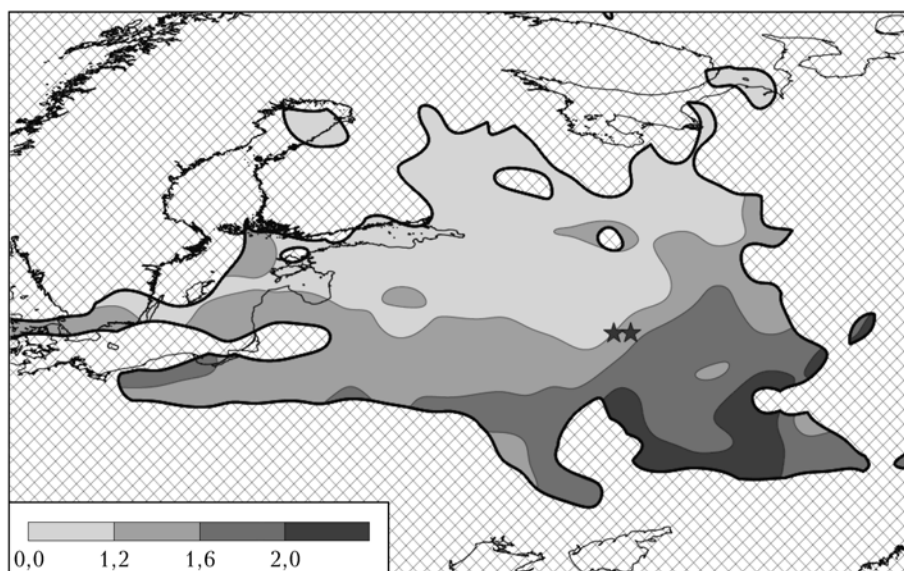
Средние эффективные поля концентраций тонкодисперсного аэрозоля, рассчитанные на основе результатов независимых наблюдений, в зоне контроля Москва–Звенигород хорошо согласуются между собой. Медианы полей концентраций по данным Звенигорода и Москвы равны 1,14 и 1,23 соответственно, а медиана поля различий – 0,05. Для зоны контроля Екатеринбург–Томск не только медианы, но и другие статистические параметры средних полей практически совпадают. Медианы полей концентраций по данным Екатеринбурга и Томска равны 1,11 и 1,10 соответственно, а медиана поля различий – 0,02.

Результаты сравнения статистических характеристик полей в зонах контроля Москва–Екатеринбург и Москва–Томск показывают, что пространственные распределения концентраций в этих зонах контроля имеют существенные различия. Вероятной причиной этого является большая удаленность друг от друга пунктов, результаты измерений в которых использовались при моделировании соответствующих полей концентраций аэрозоля.

На рис. 2 показано графическое представление результатов моделирования средних эффективных полей объемных концентраций тонкодисперсного аэрозоля методом ФЛА для контрольной зоны Москва–Звенигород по результатам измерений в Москве (рис. 2, а) и Звенигороде (рис. 2, б). Области, не попавшие в зону контроля, обозначены двойной штриховкой.



*a*



*б*

Рис. 2. Средние эффективные поля нормированных объемных концентраций тонкодисперсного аэрозоля в зоне контроля Москва–Звенигород: *a* – расчет по результатам измерений в Москве; *б* – по результатам измерений в Звенигороде

Видно, что полученные средние эффективные поля концентраций хорошо согласуются между собой качественно и количественно: в северной части зоны моделирования уровни концентраций аэрозоля существенно ниже, чем на юге и юго-востоке. Заметны и различия полей концентраций.

### Верификация метода ФЛА по данным спутниковых измерений

Другой способ верификации метода ФЛА заключается в сопоставлении рассчитанного эффективного поля концентраций аэрозоля со средним полем аэрозольной оптической толщи атмосферы (АОТ),

построенным по результатам спутниковых измерений. АОТ определяется степенью ослабления солнечной радиации в результате аэрозольного рассеяния и поглощения, а значит, может рассматриваться в качестве меры общего содержания аэрозоля в атмосфере. Результаты такого сопоставления для мелкодисперсной фракции аэрозоля приведены на рис. 3.

Из сравнения пространственных распределений средних концентраций и АОТ видны их общие закономерности: северные регионы России имеют значительно меньшие уровни аэрозольного загрязнения, чем ее центральная и южная части. Кроме того, следует отметить и существенные различия. Например, по данным измерений со спутников повышенные уровни АОТ мелкодисперсной фракции аэрозоля наблюдаются над водными поверхностями.

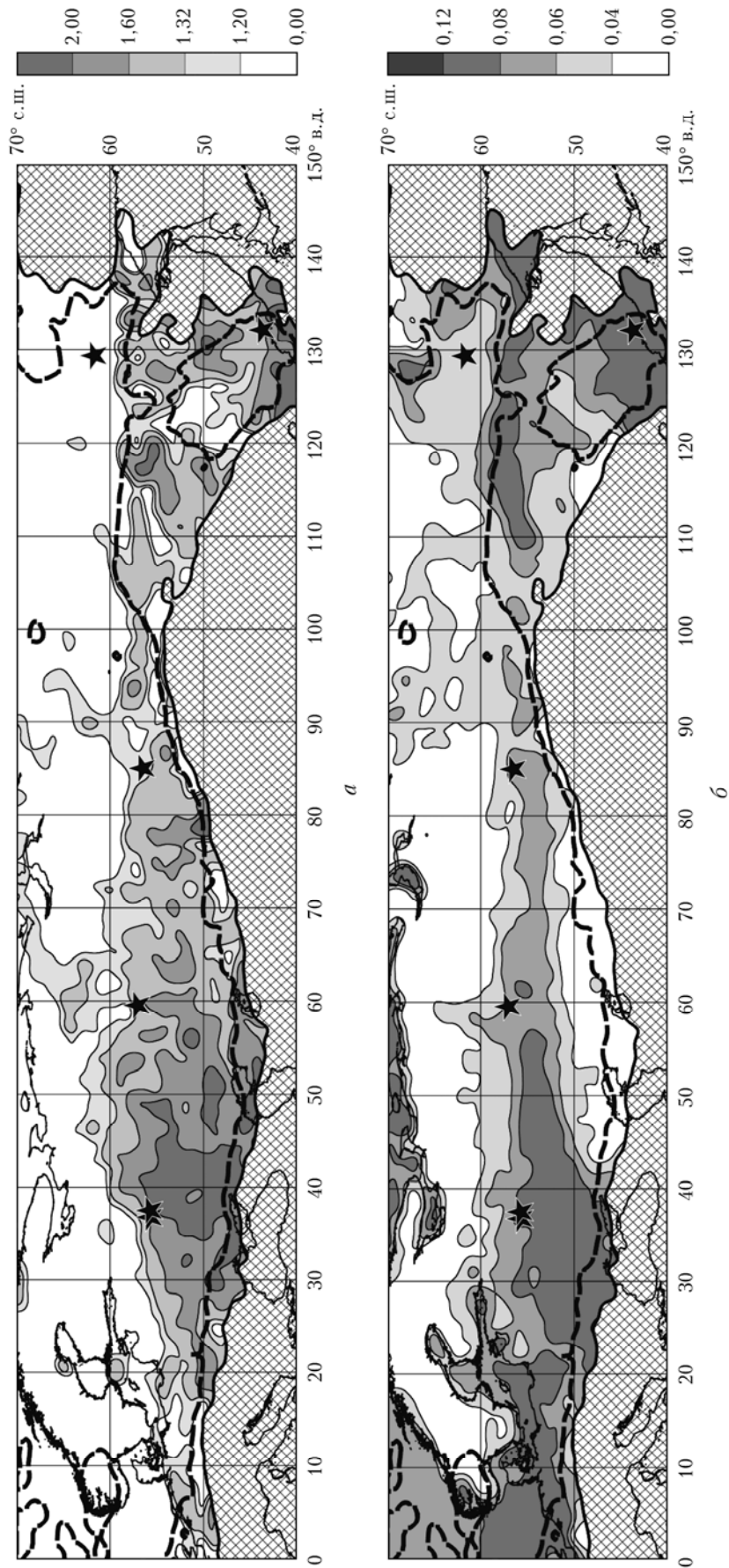


Рис. 3. Среднее эффективное поле нормированной объемной концентрации тонкодисперсной фракции аэрозоля, рассчитанное методом ФЛА (а); поле АОТ (длина волны 550 нм) тонкодисперсной фракции аэрозоля по измерениям MODIS, среднее за период с 2004 по 2010 г. (б) (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>)

Возможно, это различие объясняется тем, что использованные при моделировании методом ФЛА данные брались с глубоко континентальных пунктов мониторинга, зоны влияния которых лишь частично лежат над водной поверхностью. Исключением является станция мониторинга Уссурийск, данные которой говорят о повышенной концентрации аэрозоля над Японским морем. Другие различия требуют отдельного анализа в каждом конкретном случае.

С учетом того, что приведенные на рис. 3 поля являются грубыми оценками полей концентраций мелкодисперсного аэрозоля (в настоящей статье обсуждается моделирование квазидвумерного поля, а результаты измерений со спутников имеют ряд своих ограничений), можно сделать вывод об их приемлемом качественном согласии.

### Заключение

На основе предложенной методики построено пространственное распределение погрешностей статистической оценки среднего эффективного поля концентрации, рассчитанного в квазидвумерном приближении метода ФЛА. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о возможности использования плотности числа траекторий на расчетную ячейку  $n_{tr} = 20$  в качестве критерия определения зоны моделирования. Показано, что с помощью метода ФЛА можно давать обоснованные оценки поля концентрации примеси в атмосфере на больших расстояниях от пункта мониторинга.

Представлены результаты верификации метода ФЛА тремя способами. Несмотря на то что квазидвумерное приближение имеет ряд ограничений, все рассмотренные способы верификации указывают на возможность использования метода ФЛА для оценки средних полей концентраций тонкодисперсного аэрозоля.

Авторы благодарят всех коллег, обеспечивающих функционирование станций мониторинга AERONET. Особую благодарность выражаем С.А. Бересневу, С.Ю. Горда (УрФУ, г. Екатеринбург), М.В. Панченко, С.М. Сакерину, Д.М. Кабанову (ИОА СО РАН, г. Томск), В.Н. Holben, А.В. Smirnov, Т.Л. Kucsera (НАСА, Центр космических полетов им. Годдарда).

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН «Фундаментальные исследования, выполняемые совместно с организациями СО РАН и ДВО РАН», проект № 12-С-2-1017.

1. Stohl A., Forster C., Frank A., Seibert P., Wotawa G. Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2 // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5, N 9. P. 2461–2474.
2. Виноградова А.А., Веремейчик А.О. Поле потенциальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы в районе Ненецкого заповедника // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 760–767.

3. Ashbaugh L.L. A Statistical Trajectory Technique for Determining Air Pollution Source Regions // *J. Air Pollution Control Association.* 1983. V. 33, N 11. P. 1096–1098.
4. Seibert P., Kromp-Kolb H., Baltensperger U., Jost D.T., Schwikowski M., Kasper A., Puxbaum H. Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites // *Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere* / Ed. by P.M. Borrell, P. Borrell, T. Cvitas, W. Seiler. Den Haag: Academic Publishing, 1994. P. 689–693.
5. Stohl A. Trajectory statistics – a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe // *Atmos. Environ.* 1996. V. 30, N 4. P. 579–587.
6. Поддубный В.А. Гибридный Эйлера–Лагранжа метод статистики обратных траекторий для наземного зондирования атмосферы // Сб. тезисов Междунар. симпоз. стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2009) 22–26 июня 2009 г. СПб., 2009. С. 42–43.
7. Поддубный В.А. Метод флюид-локации атмосферы // Мат-лы XVI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 2009. С. 502–504.
8. Поддубный В.А., Наговицына Е.С. Восстановление пространственного поля концентрации атмосферного аэрозоля по данным локальных измерений: модификация метода статистики обратных траекторий // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2013. Т. 49, № 4. С. 439–446.
9. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / Под ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 484 с.
10. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Польшкин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тацилин М.А. Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 11. С. 968–975.
11. Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Польшкин В.В., Смирнов А.В., Тацилин М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б.Н., Еремина Т.А. Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 6. С. 566–574.
12. Панченко М.В., Терпугова С.А. Годовой ход содержания субмикронного аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью // *Оптика атмосф. и океана.* 1994. Т. 7, № 8. С. 1022–1032.
13. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
14. Gilbert R.O. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. N.Y.: Van Nostrand Reinhold, 1987. 320 p.
15. Land C.E. Confidence intervals for linear functions of the normal mean and variance // *Annals of Mathematical Statistics.* 1971. V. 42, N 4. P. 1187–1205.



16. Малышкин А.В., Поддубный В.А., Маркелов Ю.И., Береснев С.А., Горда С.Ю., Сакерин С.М., Смирнов А.В. Средний Урал в системе AEROSIBNET: предваритель-

ный анализ влияния региональных источников аэрозольного загрязнения атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 497–500.

*V.A. Poddubny, E.S. Nagovitsyna. Estimation of errors and verification of the fluid location of atmosphere method.*

The paper presents a technique for errors estimation of an average effective concentration field calculated by quasi-two-dimensional approach of the fluid location of atmosphere (FLA) method. Three ways of verification of the FLA method are presented. In spite of the fact that quasi-two-dimensional approach has a number of restrictions, all considered ways of verification indicate that the FLA method is usable one assessment of average fine aerosol concentration fields.