

## О возможностях методов траекторного анализа для оценки характеристик биоаэрозоля юга Западной Сибири

М.С. Асташкина<sup>1</sup>, С.А. Береснев<sup>1</sup>, А.С. Сафатов<sup>2</sup>, Г.А. Буряк<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет им. А.М. Горького  
620083, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51

<sup>2</sup>Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора  
633159, Новосибирская область, пос. Кольцово

Поступила в редакцию 4.02.2011 г.

Проведен краткий анализ, и дана оценка возможностей модели HYSPLIT для решения задач атмосферного переноса биоаэрозоля. В качестве референсного района для анализа выбран юг Западной Сибири. Обсуждаются методические особенности использования модели и достоверность получаемых результатов.

*Ключевые слова:* биоаэрозоль, атмосферный перенос, траекторный анализ; bioaerosol, atmospheric transport, trajectory analysis.

На сегодняшний день опубликовано множество данных об одиночных (часто непродолжительных по времени) отборах проб того или иного типа биоаэрозоля в различных районах мира, что позволяет констатировать сам факт присутствия биоаэрозоля, попытаться определить его химический и видовой состав, а также в ряде случаев проанализировать высотное распределение частиц в момент пробоотбора. Систематические (продолжительностью более года) пробоотборы биоаэрозоля и последующий их анализ дают богатую информацию о временной изменчивости его характеристик, однако данные такого рода в литературе практически отсутствуют (см. обзор [1]).

В Сибирском регионе систематические исследования биоаэрозоля ведутся с 1998 г. в ГНЦ ВБ «Вектор», где проводится изучение биогенной компоненты атмосферного аэрозоля на юге Западной Сибири. Они включали в себя ежемесячное самолетное зондирование атмосферы, наземные пробоотборы и отбор снеговых проб [1]. Пробы анализировали на содержание суммарного белка и содержание жизнеспособных микроорганизмов, а также проводился анализ временных рядов наблюдений.

Характерные особенности биоаэрозоля приводят к выводу о возможности дополнительных (помимо регулярных наземных и высотных пробоотборов) методов его исследования, причем эти методики отнюдь не сводятся только к рутинным измерениям метеопараметров (определение температуры, влажности, поля скорости ветра и осадков и др.). Достаточно давно для исследования дальнего

и ближнего переноса биоаэрозоля используются различные методики траекторного анализа, которые могут дать полезную информацию об источниках эмиссии частиц и истории их атмосферного переноса. Однако высокая эффективность этих методик, демонстрируемая на задачах переноса газовых трассеров или на задачах определения преобладающих для региона типов воздушных масс [2–4], может не оправдаться при анализе переноса достаточно крупных и массивных частиц биоаэрозоля.

К сожалению, из литературы известно много примеров, когда обратные или прямые траектории движения элементов воздушных масс полностью отождествляются с траекториями движения инерционных частиц биоаэрозоля.

В настоящей статье дана оценка возможностей открытого программного обеспечения (ПО) HYSPLIT [5] для задач атмосферного переноса частиц биоаэрозоля, его видимых достоинств и скрытых ограничений. Исходя из долговременности и систематичности отбора проб и большого объема полученных в ГНЦ ВБ «Вектор» результатов [1], в качестве референсного района выбран юг Западной Сибири.

### Общая характеристика и возможности ПО HYSPLIT\_4

Открытое ПО HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) [5] реализует возможности нескольких отдельных моделей: траекторной (обратные и прямые траектории), дисперсионной и модели переноса вулканического аэрозоля. Траекторная модель сопровождается информацией об изменении метеопараметров вдоль траектории движения элемента воздушных масс (температура окружающей среды, относительная

\* Мария Сергеевна Асташкина (mary\_ru@mail.ru); Сергей Анатольевич Береснев (sergey.beresnev@usu.ru); Александр Сергеевич Сафатов (safatov@vector.nsc.ru); Галина Алексеевна Буряк (buriak@vector.nsc.ru).

влажность, параметры солнечной радиации, характеристики осадков, высота подстилающей поверхности и др.). Полученные траектории должны оптимальным образом удовлетворять изменениям в поле ветра при задании ряда расчетных параметров.

Метеоданными для построения траекторий движения элементов воздушных масс и дисперсионных расчетов в HYSPLIT служат выходные поля метеорологических баз данных (например, ECMWF и др.), причем в траекторных и дисперсионных расчетах эти поля могут использоваться напрямую, так как внутренняя система координат модели следует изменяющимся координатам местности. Как минимум, HYSPLIT требует задания абсолютной высоты движения (или давления на этой высоте), давления на подстилающей поверхности, двух горизонтальных компонент скорости ветра и температуры. Помимо этого требуется и задание вертикальной компоненты скорости ветра, но если исходная информация об этом в базе данных отсутствует, то модель самостоятельно рассчитывает поле вертикальной скорости. Если в расчеты должны быть включены процессы влажного осаждения, то дополнительно требуются данные о поле осадков.

### ***Траекторная модель***

Для построения траектории адвективного переноса элемента воздушных масс требуется задание трехмерного поля скоростей ветра. В качестве входных данных задаются координаты точки наблюдения, время старта (для прямых траекторий) или время прихода (для обратных траекторий) элемента воздушной массы, общее время движения и высоты переноса. После того как метеоданные будут обработаны и интерполированы во внутреннюю сетку модели, вычисляются искомые траектории движения. Так как траекторная модель HYSPLIT изначально разработана для моделирования только адвективного переноса элементов воздушных масс, то ее использование для предсказания характеристик переноса аэрозолей, скорее всего, должно быть ограничено рассмотрением только субмикронной фракции аэрозоля.

### ***Дисперсионная модель***

В дисперсионной модели HYSPLIT помимо адвекции учитываются вертикальное и горизонтальное перемешивание частиц, их дисперсия, турбулентный перенос, сухое и влажное осаждение частиц. Так как данная модель специально разработана для описания процессов переноса аэрозоля, то в отличие от траекторной дисперсионная модель требует задания большого количества входных данных, разбитых на четыре группы: параметры источника эмиссии частиц, времени протекания процесса, осаждения частиц и параметры выходных данных. Отметим, что пользователь модели отнюдь не всегда располагает исчерпывающим набором указанных параметров, что может затруднить практическое применение дисперсионной модели.

## **Обсуждение результатов**

Траекторный анализ по моделям HYSPLIT проводился при учете способа отбора проб (наземные или высотные измерения). Для наземных измерений (далее – станции наблюдения «Ключи» с координатами 54°51' с.ш., 83°16' в.д. и «Вектор» с координатами 54°57' с.ш., 83°15' в.д.) строились суточные обратные траектории для высоты прохождения 50 м с временным шагом 1 ч. При задании высоты прохождения требовалось удовлетворить противоречивым условиям: избежать погрешностей модели, связанных с аппроксимацией характеристик приземного слоя, и гарантировать достаточно высокую вероятность осаждения биоаэрозоля в пункте пробоотбора.

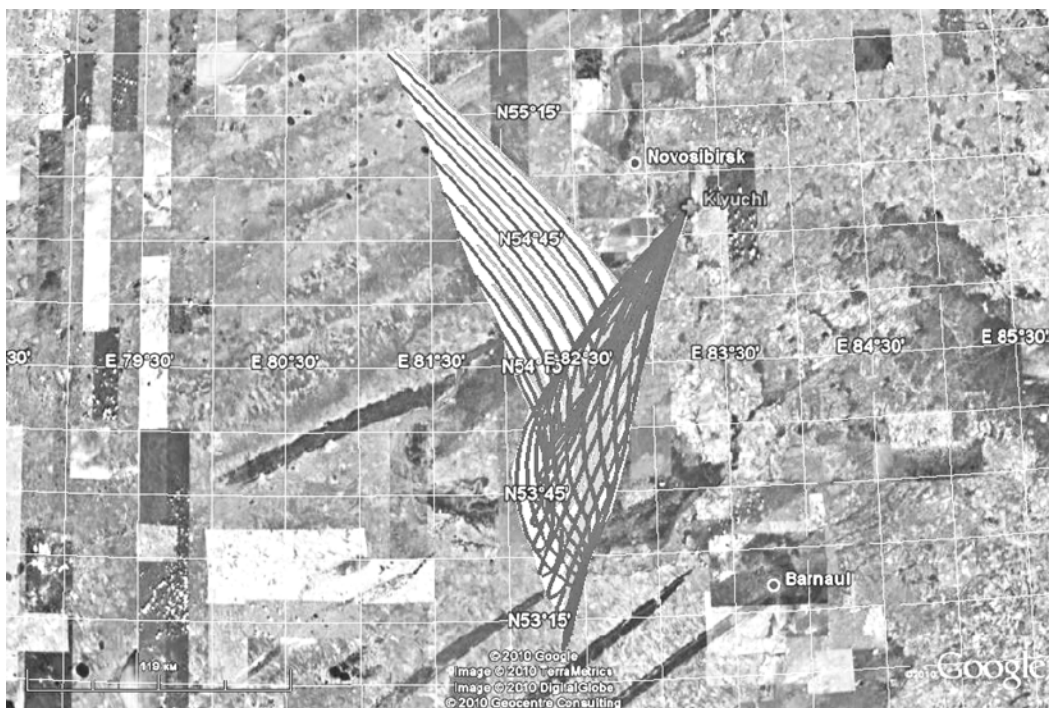
Рассчитывались только суточные траектории движения, так как за больший промежуток времени велика вероятность сухого или влажного осаждения частиц до достижения ими пункта пробоотбора. Для построения так называемых «зон влияния» (географических областей, которые могут влиять на получаемый в пункте пробоотбора сигнал за выбранный промежуток времени [6]) рассчитывались совокупности обратных траекторий с временным шагом 1 ч в течение выбранного для анализа периода.

Для верификации предложенной методики целесообразно использовать возможности дисперсионной модели HYSPLIT, задав примерные координаты источника эмиссии частиц (которые предварительно можно оценить из траекторной модели) и полное время движения воздушных масс (например, также 1 сут). Сопоставление характеристик рассчитанной пространственной зоны осаждения аэрозоля с ранее полученными обратными траекториями позволит скорректировать и уточнить задаваемые параметры в траекторной модели.

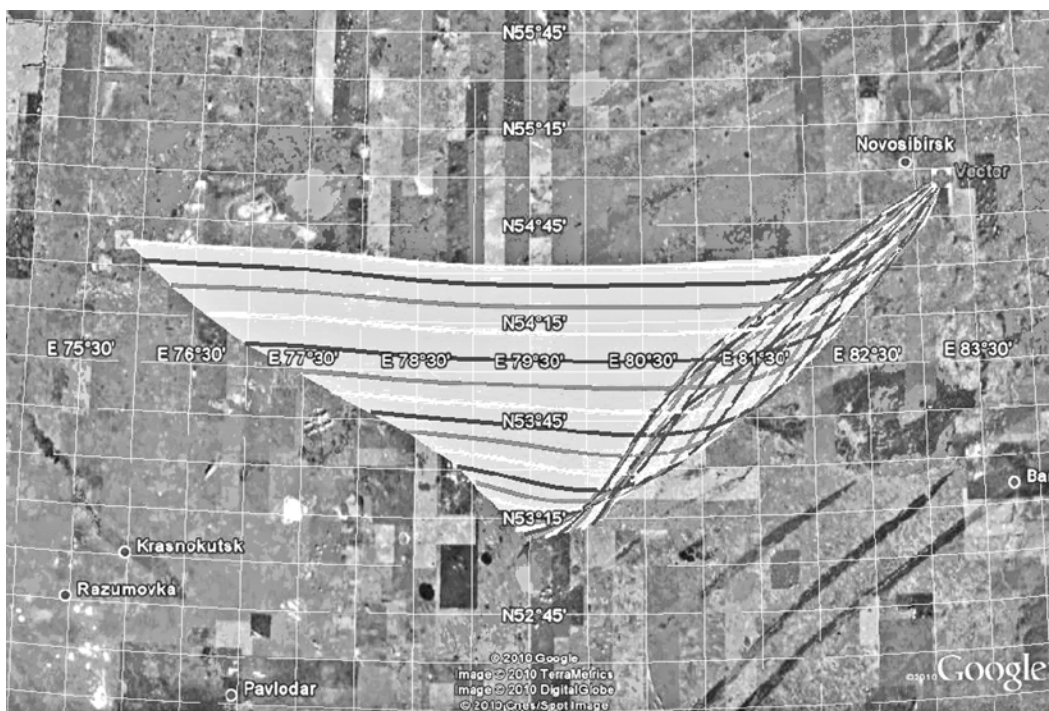
### ***Наземные станции наблюдения***

Для выявления возможных источников биоаэрозоля и путей его попадания в пробы для станций «Ключи» и «Вектор» строились «зоны влияния» при варьировании основных управляющих параметров траекторной модели – полного времени и высоты прохождения элементов воздушных масс над пунктом наблюдения. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены суточные «зоны влияния» для указанных станций на определенную дату.

Внутри этих зон располагаются обратные траектории на высоте 2 м (серые линии) и 50 м (черные линии). Траекторная модель HYSPLIT формально учитывает топографию поверхности [5], поэтому данные высоты следует трактовать как возвышения над пунктами наблюдений. Верхние линии соответствуют самым ранним временным этапам прибытия элемента воздушных масс на станцию наблюдения за указанный период, последующие траектории (с временным шагом 1 ч) сменяются ниже соответственно текущему полю ветра. Видно, что обратные траектории для высот 2 и 50 м существенно не различаются, что позволяет выбирать высоту в 50 м в качестве референсной.



*a*



*b*

Рис. 1. Суточные «зоны влияния», построенные по совокупности обратных траекторий с шагом 1 ч: *a* – ст. «Ключи» (54°51' с.ш., 83°16' в.д.), период с 09:00 15.05.2009 по 08:00 16.05.2009; *b* – ст. «Вектор» (54°57' с.ш., 83°15' в.д.), период с 10:00 29.09.2009 по 05:00 30.09.2009

Как видно из рис. 1, суточные «зоны влияния» достаточно велики по площади. Весьма вероятно, что результаты пробоотбора будут характеризовать не только локальный источник биоаэрозоля на станции, но и источники от прилегающей «зоны

влияния». Естественно предположить, что траектории на высоте 50 м характеризуют в основном ближний перенос биоаэрозоля. Если же в пробах наземных станций обнаруживаются не характерные для данного региона микроорганизмы, то это можно

объяснить, например, фактом влажного осаждения аэрозоля с гораздо больших высот, характерных для его дальнего переноса.

### **Применение дисперсионной модели для оценки гипотетического выброса**

Предположим, что в п. Кольцово произошел внезапный выброс аэрозолей. Оценим характери-

стики выброса с помощью дисперсионной модели HYSPLIT, для чего построим зону осаждения частиц при следующих предположениях: выброс произошел на высоте 100 м, продолжительность выброса 10 мин, полное время анализа последствий выброса – 1 сут. Одновременно построим прямую траекторию движения по траекторной модели HYSPLIT на тот же самый промежуток времени и сопоставим полученные результаты (рис. 2, а).



*a*



*b*

Рис. 2. Область осаждения частиц (дисперсионная модель) и прямая траектория движения элемента воздушных масс (траекторная модель HYSPLIT) для гипотетического выброса в п. Кольцово: *a* – суточная область осаждения частиц при выбросе (1 – п. Кольцово, 54°56'10" с.ш., 83°11'7" в.д., время выброса 05:00 22.10.2010) и суточная прямая траектория (2 – область, где заканчивается зона осаждения); *b* – область осаждения частиц, достигших п. Кольцово, при выбросе из условного источника в 05:00 30.10.2010 (3 – источник, 4 – местоположение элемента воздушных через 1 ч после выброса, 5 – пункт пробоотбора в п. Кольцово)

Видно, что прямая траектория фактически проходит посередине зоны осаднения в течение первых 6–8 ч, причем за это же время происходит практически полное осаднение частиц. Это подтверждает, с одной стороны, достаточную надежность расчетов по траекторной модели, а с другой — дает рациональную оценку адекватного временного интервала для построения обратных и прямых траекторий для наземных станций.

К аналогичным выводам приводит и анализ зоны осаднения частиц от выброса из условного источника, достигших п. Кольцово (рис. 2, б). Источник был определен расчетом обратной траектории, конечным пунктом которой являлся п. Кольцово. Видно, что полное осаднение частиц от выброса может произойти за еще меньшее время — 3–4 ч. Таким образом, при использовании траекторной модели для наземных станций (и задания тем самым небольших высот прохождения) достоверные результаты могут быть получены лишь для небольших временных промежутков (максимум до 6–8 ч).

### Высотные пробоотборы

Для выявления возможных источников биоаэрозоля в пункте самолетных пробоотборов биоаэрозоля вблизи г. Новосибирска исследовались семидневные обратные траектории по траекторной модели HYSPLIT на стандартных высотах измерений (от 500 до 7000 м). Как видно из рис. 3, на высотах от 500 до 3000 м (кривые 1–5) может преобладать ближний и средний перенос аэрозоля, причем возможен как западный, так и восточный его перенос.

На высотах от 4000 до 7000 м (кривые 6–8), напротив, должен преобладать дальний западный ветровой перенос. При этом необходимо достаточно осторожно интерпретировать стартовые точки обратных траекторий как возможные источники эмиссии биоаэрозоля, который может быть обнаружен при высотных пробоотборах.

### Заключение

Изучив возможности открытого ПО HYSPLIT, авторы заключают, что при правильной постановке задачи и грамотной интерпретации результатов анализа с его помощью можно получить достаточно полезную информацию о характерных особенностях атмосферного переноса биоаэрозоля. Построение и анализ обратных траекторий движения элементов воздушных масс на достаточно малых временах и высотах движения дают достаточно достоверную информацию о ближнем переносе аэрозоля, полезную для трактовки результатов наземных пробоотборов.

Очень большие возможности предоставляет дисперсионная модель HYSPLIT. В частности, она может быть эффективно использована для верификации данных, полученных по траекторной модели. Однако для ее полномасштабного и достоверного использования необходимо располагать подробной информацией об источнике и характеристиках эмиссии частиц, что не всегда возможно. В этом случае приходится ограничиваться только анализом прямых траекторий, построенных с соблюдением ряда эмпирически полученных правил.

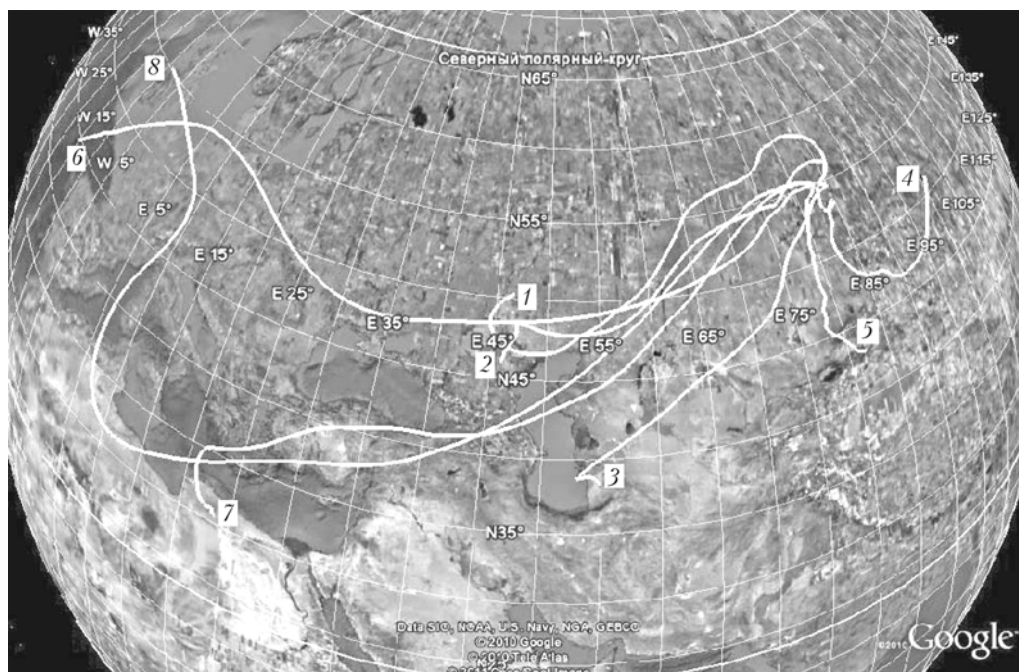


Рис. 3. Обратные семидневные траектории по траекторной модели HYSPLIT для стандартного пункта самолетных пробоотборов (54.3° с.ш., 82.09° в.д. вблизи г. Новосибирска) на 31.05.2002 на высотах: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 3000, 6 — 4000, 7 — 5500 и 8 — 7000 м

Несомненными достоинствами модели HYSPLIT являются ее общедоступность и открытость, данное программное обеспечение хорошо документировано, находится в постоянном развитии и имеет обширную библиографию по конкретным задачам атмосферного переноса. Как и другие аналогичные модели, модель HYSPLIT не свободна и от ряда общих недостатков: не достаточно точно заданные начальные координаты траектории, не достаточно подробная модель рельефа подстилающей поверхности, неточности в данных поля ветра являются главными источниками ошибок в расчетах траекторий движения элементов воздушных масс.

Очевидно также, что основная идея модели – рассчитать единственную траекторию движения (прямую или обратную), оптимальным образом соответствующую полю ветра на момент прихода в задаваемый географический пункт, – уже содержит ограничения в полноте и качестве получаемой при этом информации. Несомненно, что в пункт пробоотбора могут поступать аэрозольные частицы с различных направлений, в том числе и не отвечающих критериям построения траекторий в модели HYSPLIT. Эти принципиальные ограничения снимаются в других теоретических подходах и расчетных моделях (их обзор представлен, например, в [7]), однако эти модели не обладают важными особенностями модели HYSPLIT – ее открытостью, общедоступностью и удобством в использовании.

*M.S. Astashkina, S.A. Beresnev, A.S. Safatov, G.A. Buryak. About opportunities of trajectory analysis methods for estimation of bioaerosol characteristics in the south of Western Siberia.*

A concise analysis and estimation of opportunities of the HYSPLIT model for problems of atmospheric bioaerosol transport is carried out. As the tested area for the analysis the south of Western Siberia had been chosen. The methodical features of the model used and reliability of received results are discussed.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-01-00649) и Минобрнауки России (госконтракты № П1151 и П1571).

1. Safatov A.S., Buryak G.A., Andreeva I.S., Olkin S.E., Reznikova I.K., Sergeev A.N., Belan B.D., Panchenko M.V. Atmospheric Bioaerosols // Aerosol: Science and Technology / Ed. I. Agranovski. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. Chapt. 14. P. 407–455.
2. Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories. A review and bibliography // Atmos. Environ. 1998. V. 32, N 6. P. 947–966.
3. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition // Austral. Meteorol. Mag. 1998. V. 47, N 4. P. 295–308.
4. Деметьева А.Л., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Цыдыпов В.В. Ветровой режим и особенности атмосферной циркуляции пыльных бурь в пустыне Гоби // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 615–620.
5. URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>
6. 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: предварительный анализ влияния региональных источников аэрозольного загрязнения атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 497–500.
7. Бородулин А.И., Сафатов А.С., Белан Б.Д., Паченко М.В., Пененко В.В., Цветова Е.А. Высотные профили концентрации биоаэрозолей в тропосфере юга Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 694–698.