

К.П. Куценогий, А.И. Смирнова

Метод обратных траекторий для идентификации источников атмосферных аэрозолей регионального и глобального масштабов

Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 16.02.2001 г.

С помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) National Oceanic and Atmospheric Administration (США) по архивным метеорологическим данным построены обратные траектории движения воздушной массы в пограничном слое атмосферы для разных сезонов года (для 30 дней в каждом сезоне) на севере Западной Сибири (пос. Тарко-Сале Ямало-Ненецкого автономного округа). Выделены наиболее часто встречающиеся типы траекторий с учетом их направления и длины.

Начиная с 1996 г. на севере Западной Сибири ведется мониторинг атмосферных аэрозолей (АА) для оценки антропогенной нагрузки от источников локального, регионального и глобального масштабов [1–5]. К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по пространственно-временному изменению химического состава атмосферных аэрозолей северных районов Западной Сибири. Началось создание базы данных различных характеристик АА в Сибири [6].

Значения среднесуточных концентраций различных компонентов химического состава (элементный, ионный) АА, измеряемые в течение продолжительного промежутка времени (около месяца), изменяются в широком пределе (в десятки раз). Интервал этих изменений зависит от времени года. Природа таких изменений достаточно детально изучалась в 60–70-х гг. 20-го столетия после начала крупномасштабных испытаний ядерного оружия. Показано, что они связаны с особенностями переноса воздушной массой аэрозольных частиц в атмосфере. Сложность и разнообразие метеорологических процессов, описывающих эти закономерности, привели к формированию нового научного направления, которое получило название ядерная метеорология [7–11]. В конце 70 – начале 80-х гг. методы ядерной метеорологии начали широко использоваться при решении проблем загрязнения окружающей среды [12–20].

Выяснение закономерностей наблюдаемых пространственно-временных изменений концентрации тех или иных примесей проводили с помощью метеорологических данных о перемещении воздушных масс, а источник эмиссии, как правило, был достаточно хорошо известен и четко идентифицировался по специфическому признаку, например по конкретному радионуклиду. Для химических веществ в атмосфере трудно определить источник примеси. Это связано с тем, что возможных источников химических элементов или соединений, как правило, множество. Более того, эти источники различны по мощности и хаотично расположены в пространстве. В случае, когда известны мощность и расположение источника, с достаточной точностью можно рассчитать поле концентраций и его временное изменение, если заданы метеоусловия (см., напри-

мер, [11]). В большинстве практических случаев полная информация, необходимая для проведения расчетов, отсутствует, поэтому нужны другие подходы. Один из возможных вариантов решения этой проблемы изложен в [4, 5].

При организации мониторинга загрязнения атмосферы, связанного с выяснением переносов регионального и глобального масштабов, на пункте наблюдения одновременно изменяются концентрации нескольких ингредиентов, каждый из которых создается несколькими источниками. Поэтому одной из первоочередных задач мониторинга является выяснение (идентификация) конкретного источника, а также определение предполагаемого его места расположения.

Для идентификации удаленных источников примесей, влияющих на уровни загрязнения атмосферы в точках, где проводятся систематические наблюдения, широко используется либо метод «отпечатков» [21, 22], либо метод обратных траекторий движения воздушных масс [15–20, 23–28]. В основе метода «отпечатков» лежит отношение концентраций различных элементов к базовому. В зависимости от решаемых задач базовый элемент выбирается как наиболее значимый трассер, отражающий специфические особенности идентифицируемой территории. Метод обратных траекторий позволяет проследить перенос аэрозолей субмикронного размера воздушными массами на значительные расстояния. Он характеризует специфику метеорологической обстановки в течение конкретного периода наблюдения.

Пути перемещения воздушной массы рассчитываются с помощью различных математических моделей, использующих метеорологические базы данных. В наших исследованиях использовались модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model – гибридная лагранжевая модель интегрированной траектории одиночной частицы) [29] и архивные метеорологические данные (архив FNL) National Oceanic and Atmospheric Administration (США). Архив FNL содержит информацию о метеопараметрах в двух полусферных сетках полярной стереографической проекции 129×129 с шагом 190,5 км на широте 60°. Он содержит все основные метеорологические

параметры на 14 уровнях от поверхности земли до 20 мбар. Модель расчета траекторий движения воздушной массы позволяет строить прямые и обратные траектории с учетом вертикальных перемещений. Максимальный срок расчета 5 сут, шаг по времени 6 ч.

Цель наших исследований – оценить характерные типы траекторий движения воздушных масс в один из пунктов наблюдения (пос. Тарко-Сале Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа) в разные сезоны года. Поселок Тарко-Сале расположен в субполярной области пониженного давления, в зоне влияния Исландского минимума. Этот район можно рассматривать как фоновую территорию по загрязнению воздуха, так как здесь нет крупных промышленных предприятий и 8–9 мес в году почва покрыта снегом.

Были построены обратные траектории для этого пункта (широта 65° с.ш., долгота 78° в.д.) для всех сезонов 1999 г. по 1 мес в каждом сезоне: 5 января – 10 февраля, 1–30 апреля, 1–31 июля и 1–30 ноября. Расчеты проводились для тех сроков, в которые в 1999 г. в пос. Тарко-Сале производились отборы проб приземного аэрозоля. Траектории продолжительностью 120 ч (5 сут) рассчитывались на высотах 10, 500 и 1000 м. На высоте 10 м проводятся стандартные метеорологические наблюдения за скоростью и направлением ветра. Значения скорости ветра на этой высоте определяются процессами тепло- и массообмена в приземном слое атмосферы. Поэтому траектории на высоте 10 м наиболее точно отражают специфику изменения концентрации поллютантов при наземном мониторинге.

Высота 500 м отражает состояние пограничного слоя атмосферы, а высота 1000 м в некоторой степени характеризует динамику воздушных масс в свободной атмосфере (значение скорости ветра на этой высоте близко к величине скорости геострофического ветра). Траектории на этих высотах в наибольшей степени отражают дальний транспорт примесей регионального и глобального масштабов.

Для проверки правильности построения обратных траекторий из конечных точек были построены траектории вперед для нескольких сроков. В большинстве случаев обратные и прямые траектории совпали, но в некоторых случаях наблюдалось их расхождение. Поэтому при использовании этого метода для идентификации источников аэрозолей рекомендуется всегда проводить такую проверку.

Из всех 128 построенных траекторий удалось классифицировать 93. Это траектории с определенным, хотя часто и сложным, направлением. Остальные 35 траекторий отличаются тем, что за 120 ч неоднократно изменяют свое направление или на разных высотах очень сильно расходятся. В таблице приведены типы и подтипы траекторий. Выделено 6 типов, которые указывают основные направления, откуда приходит воздушная масса: N – север, NE – северо-восток, W – запад, S – юг, SW – юго-запад, NW – северо-запад. Поскольку 120-часовые траектории представляют собой сложные кривые, в классификацию добавлены подтипы, которые учитывают все азимутальные направления относительно пос. Тарко-Сале, через которые проходит воздушная масса. Подтипы учитывают длину траектории, а также прохождение воздушной массы только над сушей или над сушей и морем.

Типы траекторий движения воздушной массы

№ типа	Тип	Под-тип	Направление	Уточнение	Число, месяц	Количество дней под-типа	Количество дней типа	Количество дней типа по сезонам	Количество дней с устойчив. направ.	% типа
1	N	N1	NNW	До Новой Земли	1–5, 19 апр. 9, 11, 22 июля	9	33	Весна – 16 Лето – 16 Осень – 1	21	35 (26)
		N2	NNW	+ Новая Земля	16–18, 23–24, 26–30 апр., 2–5, 8, 12–13, 18–21, 30–31 июля, 8 ноября	24				
2	NE	NE1	NE	Суша	22–24, 26–27 янв.	5	18	Зима – 9 Весна – 4 Осень – 5	10	19 (14)
		NE2	NE	+ море	20–21, 25, 28 янв. 15, 20–22 апр., 7, 19–22 ноября	13				
3	W	W1	W	Скандинавский п-в	6 янв., 27–28 апр., 1, 14, 23–25, 29 июля, 4, 24 ноября	11	13	Зима – 2 Весна – 3 Лето – 6 Осень – 2	3	14 (10)
		W2	W	До долг. 30° в.д.	5 янв., 25 апреля	2				
4	S	S	S		9, 15 янв., 3–4, 10 фев., 1–2 ноября	7	7	Зима – 5 Осень – 2		8 (5)
5	SW	WS1	WS	Суша до Касп. моря	10, 13 янв., 12–13 апр., 26 июля, 14–15 ноября	7	12	Зима – 7 Весна – 2 Лето – 1 Осень – 2		13 (9)
		WS2	WS	+ Касп. море	7–8, 11 янв., 8–9 февраля	5				
6	NW	NWS	NWS		12 янв., 5–7 фев., 7–11 апр., 13 ноября	10	10	Зима – 4 Весна – 5 Осень – 1	8	11 (8)

Подсчитано число дней по сезонам и общее число дней для всех типов и подтипов траекторий. Особый интерес представляют дни с устойчивой циркуляцией, когда тип траектории сохраняется три и более дней. В таких случаях легче идентифицировать источники загрязнений, переносимых воздушной массой, и провести сопоставление расчетов с результатами экспериментальных наблюдений. Общее количество дней с устойчивым направлением пере-

носа – 42, из них половина (21 день) относится к северному типу траектории.

В последнем столбце таблицы приведен процентный состав траекторий по типам. Верхнее число – процент данного типа от 93 значений, попавших в эту классификацию, нижнее число – процент от всех рассмотренных 128 траекторий. Из таблицы видно, что в этом районе преобладает северо-западный перенос. Северо-западная составляющая

попадает в три типа: 1, 3 и 6-й, это составляет 60% (35 + 14 + 11) от 93 траекторий и 44% (26 + 10 + 8) от 128. Эти типы траекторий чаще всего наблюдаются летом и весной. Южный и юго-западный выносы характерны для зимнего периода, что соответствует климатическим данным.

Описание типов траекторий

N – северное направление с выносом воздушной массы из районов Арктики. Подтип определяет, проходит ли траектория над о. Новая Земля.

NE – перенос с северо-восточного направления, чаще всего из Якутии (долгота около 140° в.д., но при сильных ветрах значительно дальше (22 ноября 1999 г. траектория на высоте 1000 м берет начало в Америке на долготе 120° з.д.). Различия подтипов: проходит ли воздушная масса только над сушей или только над морем. Большинство траекторий восточного направления проходят и над морями Северного Ледовитого океана.

W – траектории западного направления. Среди попавших в эту категорию большинство начинается в районе Скандинавского п-ва и окружающих его морей. Но есть и короткие траектории, которые проходят только над сушей.

S – траектории южного направления обычно начинаются в районе озера Балхаш или севернее него.

SW – траектории юго-западного направления различаются тем, что они над Каспийским морем либо проходят либо нет.

NW – траектории этого типа часто начинаются в полярных широтах, проходят по территории Европы на юг до 50° с.ш., не достигая Каспийского моря.

На рис. 1–6 представлены расчетные 120-часовые обратные траектории для пос. Тарко-Сале, характеризующие основные типы, указанные в таблице. В верхней части этих рисунков даны проекции траекторий в горизонтальной плоскости, в нижней – вертикальные проекции траекторий и приведены шкалы дат и времени. Траектории рассчитаны для различных высот.

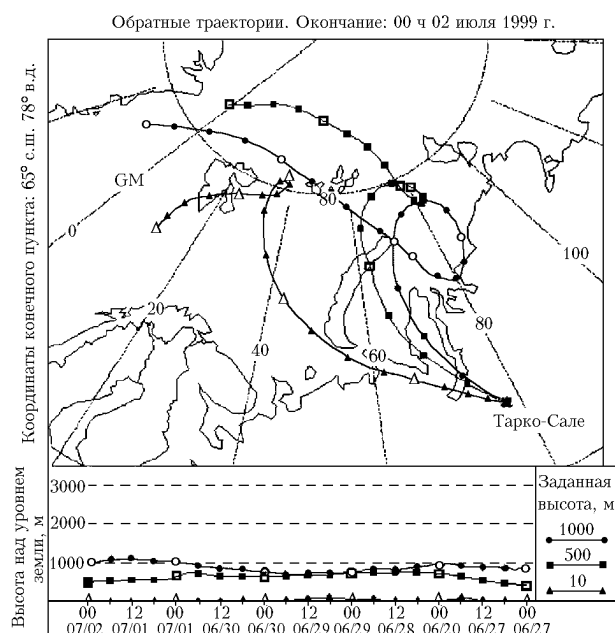


Рис. 1. Траектории типа N

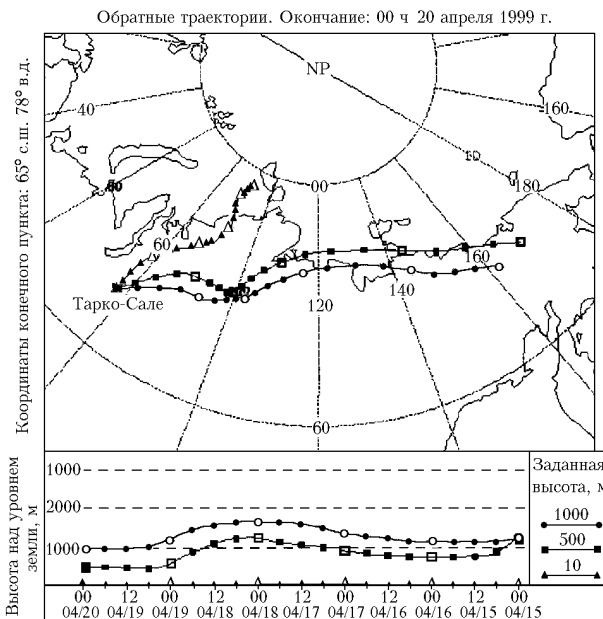


Рис. 2. Траектории типа NE

Из представленных примеров видно, насколько сложны траектории движения воздушных масс. Как правило, в точку наблюдения за 5-дневный период наблюдений приходят воздушные массы из самых различных районов. При этом районы, из которых поллютанты достигают точки наблюдения, различны для точек отбора, расположенных на разных высотах. Поэтому при сопоставлении результатов измерения вертикальных профилей химического состава АА даже в одной точке наблюдения необходимо это иметь в виду, так как усредненная проба аэрозолей, отобранных на разных высотах, может отражать химический состав частиц от разных источников.

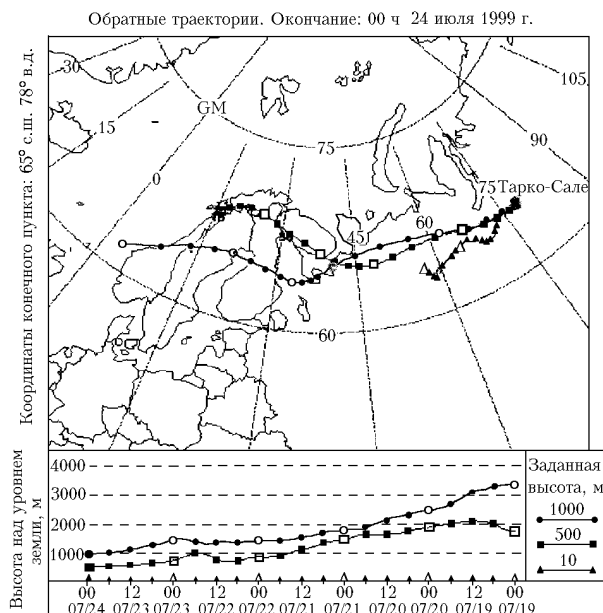


Рис. 3. Траектории типа W

Наиболее корректны результаты сопоставления химического состава аэрозольных частиц, характеризующих

тот или иной тип источника в случае, когда указаны конкретно пространственное расположение места отбора, время и продолжительность отбора проб. Наиболее подходящими условиями для интерпретации результатов таких измерений будет период, при котором обратные траектории на разных высотах наиболее близко совпадают друг с другом. Поэтому одной из наиболее важных задач, которую позволяет решить методика обратных траекторий, – это определение условий, когда сформулированные выше требования выполняются. Так, например, если отбор проб производить на высоте 500 м, то наиболее благоприятными условиями можно считать 20.04.99 (см. рис. 2) и 8.04.99 (см. рис. 6).

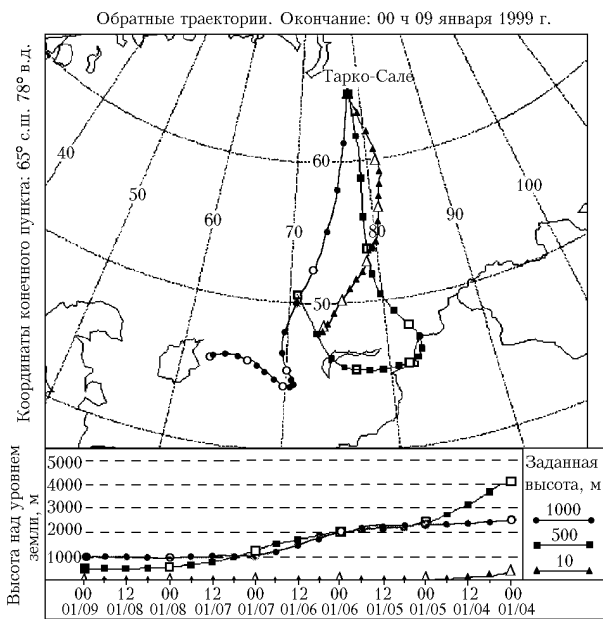


Рис. 4. Траектории типа S

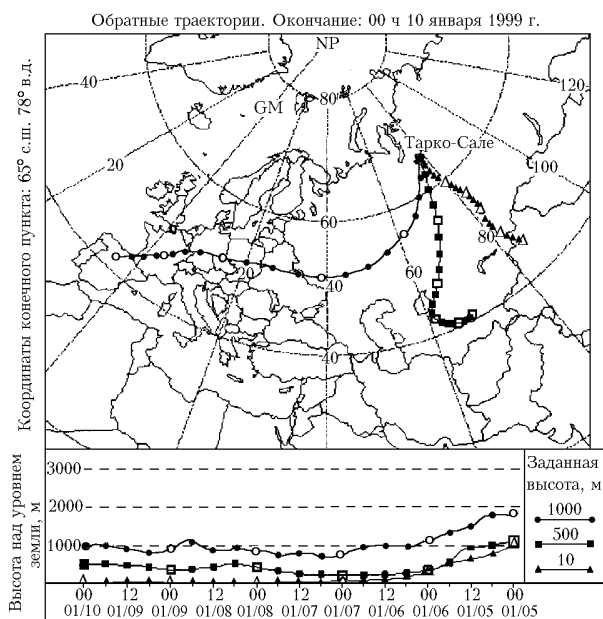


Рис. 5. Траектории типа SW

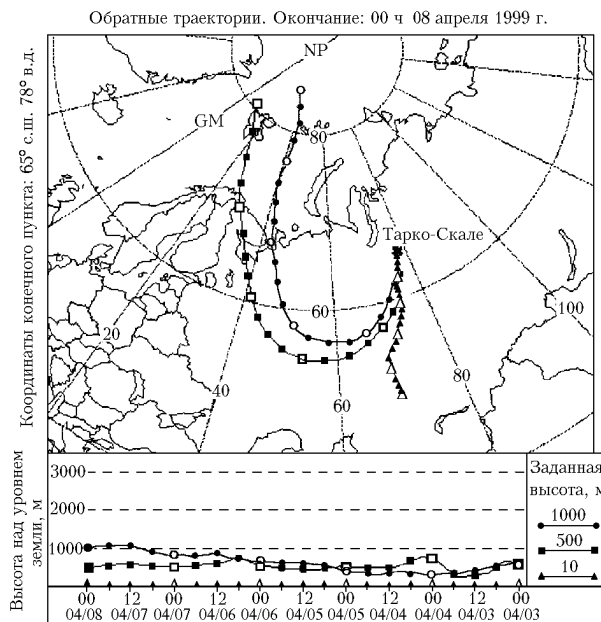


Рис. 6. Траектории типа NW

Следующая задача, которую мы предполагаем исследовать, состоит в поиске оптимальных условий для интерпретации наземных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 64 «Аэрозоли Сибири».

1. Куценогий К.П., Куценогий П.К. Мониторинг химического и дисперсного состава атмосферных аэрозолей в Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 1997. № 5. С. 457–471.
2. Куценогий К.П., Куценогий П.К. Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сибирский экологический журнал. 2000. Т. 7. № 1. С. 11–20.
3. Смоляков Б.С. Проблема кислотных выпадений на Севере Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2000. Т. 7. № 1. С. 21–30.
4. Рапута В.Ф., Смоляков Б.С., Куценогий К.П. Оценка содержания нитратов и сульфатов в снегу окрестностей нефтегазового факела // Сибирский экологический журнал. 2000. Т. 7. № 1. С. 103–107.
5. Рапута В.Ф., Смоляков Б.С., Куценогий К.П., Смирнова А.И., Ярославцева Т.В. Анализ временной динамики изменения состава атмосферного аэрозоля на севере Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2000. Т. 7. № 1. С. 97–102.
6. Смирнова А.И., Куценогий К.П. База данных «Аэрозоли Сибири» // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 687–689.
7. Стуро Б.И. Вопросы ядерной метеорологии. Вильно: Изд. АН ЛитССР, 1959. 205 с.
8. Вопросы ядерной метеорологии / Под ред. И.А. Кароля и С.Г. Малахова. М.: Атомиздат, 1962. 272 с.
9. Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии. М.: Атомиздат, 1965. 492 с.
10. Кароль И.Л. Радиоактивные изотопы и глобальный перенос в атмосфере. Л.: ГИМИЗ, 1972. 365 с.
11. Метеорология и атомная энергия. Л.: ГИМИЗ, 1971. 648 с.
12. Физические аспекты загрязнения атмосферы. Физика атмосферы. Вильно: Моклас, 1976. Т. 2. 295 с.
13. Радиоактивность атмосферы и гидросферы. Радиоактивные трассеры. Физика атмосферы. Вильно: Моклас, 1977. Т.3. 226 с.
14. Химические и радиоактивные загрязнения атмосферы и гидросферы. Физика атмосферы. Вильно: Моклас, 1978. Т. 4. 166 с.
15. Радиоактивные трассеры в исследовании атмосферы и гидросферы. Физика атмосферы. Вильно: Моклас, 1979. Т. 5. 203 с.

16. *Распространение примесей в окружающей среде. Физика атмосферы.* Вильнюс: Моклас, 1980. Т. 6. 186 с.
17. *Проблемы исследований загрязнения атмосферы. Физика атмосферы.* Вильнюс: Моклас, 1981. Т. 7. 164 с.
18. *Примеси в атмосфере и их применение в качестве трассеров. Физика атмосферы.* Вильнюс: Моклас, 1982. Т. 8. 145 с.
19. *Локальные и глобальные примеси в атмосфере. Физика атмосферы.* Вильнюс: Моклас, 1983. Т. 9. 143 с.
20. *Исследование примесей в атмосфере. Физика атмосферы.* Вильнюс: Моклас, 1984. Т. 10. 118 с.
21. *Rahn K.A.* The chemical composition of the atmospheric aerosol. Technical Report. Graduate School of Oceanography University of Rhode Island, Kingstone, Rhode Island 02881. 1976. 265 p.
22. *Rahn K.A.* Progress in Arctic air chemistry, 1980–1984 // *Atmos. Environ.* 1985. V. 19. N 12. P. 1987–1994.
23. *Виноградова А.А., Малков И.П., Назаров Б.И., Полиссар А.В.* Об определении путей переноса антропогенного аэрозоля в северные районы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1988. Т. 24. № 7. С. 680–686.
24. *Виноградова А.А., Полиссар А.В.* Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части Российской Арктики // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1995. Т. 31. № 2. С. 264–274.
25. *Виноградова А.А.* Элементный состав атмосферного аэрозоля Восточной Арктики // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1996. Т. 32. № 4. С. 479–486.
26. *Виноградова А.А., Егоров В.А.* Вклад промышленных территорий северного полушария в загрязнение атмосферы Российской Арктики // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1996. Т. 32. № 6. С. 796–802.
27. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р.* Аэрозоли Арктики. Результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
28. *Jenning S.G., McGovern F.M. and Cooke W.F.* // *Atmos. Environ.* 1993. V. 27A. N 8. P. 1229–1239.
29. HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model, 1997. Web address: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

K.P. Koutzenogii and A.I. Smirnova. Method of back trajectories used to identify the sources of atmospheric aerosols on regional and global scale.

The back trajectories of air mass motion in the atmospheric boundary layer have been constructed for different seasons (for 30 days in each season) in the north of Western Siberia (settlement Tarko-Sale of Jamalo-Nenets Autonomous Region) using the model HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrange Integrated Trajectory Model) of National Oceanic and Atmospheric Administration (USA) and the archives of meteorological data. The most commonly occurring types of trajectories have been distinguished with respect for their direction and length.