

УДК 551.510.42

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСГРАНИЧНОГО ПЕРЕНОСА  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В КАЗАХСТАНЕ С ПОМОЩЬЮ  
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА HYSPLIT\_48**

И.В. Каипов

Канд. геогр. наук И.Б. Есеркепова

*Представлены возможности использования программного комплекса HYSPLIT\_48 в Казахстане для моделирования трансграничного переноса загрязняющих веществ в атмосфере. Получены оценки массы выпадений тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей на территорию Казахстана и на соседние страны. Сделан вывод о том, что данный программный комплекс может служить инструментом для оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ в Казахстане в рамках Конвенции Европейской экономической комиссии ООН о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния.*

Программный комплекс HYSPLIT\_48 представляет собой систему, которая предназначена для решения относительно простых задач расчета траектории выноса и моделирования сложных процессов трансграничного переноса, рассеивания и выпадения аэрозолей и газообразных примесей различного генезиса. Алгоритмы расчета представляют собой гибридный эйлеро-лагранжевый приближения. Адвекция и диффузия рассчитывается в лагранжевой системе координат, а концентрация – в фиксированных узлах сетки [5, 6].

Перенос и рассеивание примесей рассматривается или как простой выброс облака или как рассеивание кластера частиц. Модель использует предварительно интерполированные в узлы сетки метеорологические данные. Расчет концентрации примесей в атмосфере требует задания источника и физических характеристик примеси. Система моделирования представляет собой модульную структуру с пользовательским графическим интерфейсом для установки параметров и запуска модулей для расчета траектории, концентрации и выпадения частиц.

Обычно поля метеорологических данных, полученные различными расчетными моделями, не могут напрямую использоваться в моделях дисперсии без предварительной обработки. Это связано с тем, что выходные

данные метеорологических моделей представляются в разных вертикальных координатных системах. Для придания большей гибкости и возможности использования метеорологических данных из разных источников метеорологические профили в каждой горизонтальной точке сетки линейно интерполируются на принятую в дисперсионной модели вертикальную  $\sigma$ -координатную систему:

$$\sigma = (Z_{top} - Z_{msl}) / (Z_{top} - Z_{gl}), \quad (1)$$

где  $Z_{gl}$  – высота относительно уровня моря;  $Z_{msl}$  – высота уровня моря;  $Z_{top}$  – максимальная высота.

Горизонтальная сетка в дисперсионной модели выбрана так, чтобы она была идентична представлению метеорологических данных. Поддерживаются три ортоморфические проекции (Polar Stereographic, Mercator, Lambert Conformal). Временной интервал, принятый для полей метеорологических переменных в узлах регулярной сетки, для региональных моделей составляет 3 часа, для глобальных – 6 часов. Для проведения расчетов в дисперсионной модели минимально требуются следующие метеорологические поля:  $U$ ,  $V$  – горизонтальные компоненты скорости ветра;  $T$  – температура;  $Z$  – высота;  $P$  – давление;  $P_o$  – давление у земной поверхности.

В лагранжевой модели вычисления концентрации примеси в атмосфере производятся на основании одного из двух приближений. В модели «облака» источник задается путем моделирования выброса облаков через определенные интервалы времени за весь промежуток действия источника. Каждое облако содержит определенную массу загрязняющих веществ. Адвекция облака происходит по траектории движения его геометрического центра, в то время как горизонтальные и вертикальные размеры облака изменяются благодаря рассеивающей природе турбулентной атмосферы. В модели «частицы» источник моделируется как выброс многих частиц в течение времени действия источника. К адвективному движению каждой частицы на единичном временном шаге добавляется случайный компонент движения, который определяется турбулентностью атмосферы. В гибридной схеме, принятой в используемой версии программы, модель «облака» применяется для расчета горизонтальной, а модель «частицы» для расчета вертикальной дисперсии примесей.

Для модели «облака» рассматриваются два случая: когда размеры облака меньше размера вычислительной сетки и когда облако превышает

размеры сетки. В последнем случае подразумевается, что метеорологическая модель описывает турбулентные движения.

Модель также может быть использована для моделирования пыльных бурь. Для минеральной пыли выпадение частиц из потока определяется скоростью их выпадения, что эквивалентно скорости гравитационного оседания. Скорость выпадения может быть также рассчитана с использованием метода сопротивления и информации о структуре подстилающей поверхности.

Модель переноса твердых частиц, содержащих тяжелые металлы, в региональном и глобальном масштабах основывается на концепции критической скорости срыва частиц с поверхности, которая в свою очередь зависит от шероховатости подстилающей поверхности [1, 2].

Вертикальный поток частиц пыли  $F$  рассчитывается по соотношению

$$F = K \cdot \rho \cdot u_* (u_* - u_{*t}) / g, \quad (2)$$

где  $u_*$  – динамическая критическая скорость,  $u_{*t}$  – динамическая критическая скорость срыва частиц с поверхности,  $\rho$  – плотность воздуха,  $g$  – ускорение свободного падения,  $K$  – с размерностью  $m^{-1}$ , коэффициент пропорциональности, определяющий структуру подстилающей поверхности.

Динамическая скорость может варьировать в пространстве и во времени, поскольку зависит от метеорологических параметров и свойств подстилающей поверхности. Однако динамическая критическая скорость срыва частиц с поверхности и коэффициент пропорциональности изменчивы только в пространстве и зависят от характеристик поверхности.

Зная динамическую критическую скорость срыва, можно рассчитать критическую скорость срыва на заданной высоте

$$u_t = \frac{u_{*t}}{k} \ln \left( \frac{z}{z_{ons}} \right), \quad (3)$$

где  $z_{ons}$  – параметр шероховатости в отсутствии процесса сальтации,  $z$  – высота измерения скорости  $k$  – постоянная Кармана, равная 0,4.

Коэффициент лобового сопротивления  $C_{Dnc}$  при отсутствии сальтации определяется как  $\sqrt{C_{Dnc}} = k / \ln \left( \frac{z}{z_{ons}} \right)$ .

В условиях сальтации  $\sqrt{C_{Ds}} = \sqrt{C_{Dns}} + 0,003 \left( 1 - \frac{u_t}{u} \right)$ .

Следовательно, для  $u < u_t$   $C_D = C_{Dns}$  и  $C_D = C_{Ds}$  для  $u > u_t$ , т.е.  $u_* = \sqrt{C_D} \cdot u$ , где  $u$  – скорость ветра.

С вычислительной точки зрения область потенциального источника имеет определенные значения  $u_{*t}$ ,  $z_{ons}$  и  $K$ .

Расчет критической скорости срыва частиц для поверхности без растительности определяется как отношение динамической критической скорости для ровной поверхности к фактору эффективности

$$u_*(D_p, z_0) = \frac{u_{*ts}(D_p)}{f_{eff}},$$

где  $f_{eff}$  – фактор эффективности, определяется соотношением  $f_{eff} = \frac{u_{*s}}{u_*}$  и

является отношением локальной динамической скорости к общей.

Далее кратко описывается программный комплекс и алгоритм для моделирования переноса тяжелых металлов и стойких органических соединений.

Логически программный комплекс разделен на следующие части:

1. Получение (скачивание) метеорологических данных со специализированных FTP серверов, их конвертация в формат, принятый в HYSPLIT\_48, проверка, визуализация и анализ данных.
2. Установка параметров, расчет и визуализация траектории выноса примеси.
3. Специальные расчеты от множественных источников различной локализации, времени действия и природы.
4. Установка параметров, расчет концентрации примеси и визуализация.
5. Специальные расчеты от множественных источников различной локализации, времени действия и природы, включая моделирование пыльных бурь.
6. Выбор утилит для более детальной установки параметров модели, скачивания спутниковых данных (аэрозольный индекс) и их совместная визуализация с расчетными данными.

Рассмотрим процедуру подготовки и моделирования переноса примесей для выбранного региона (Казахстан). Программный комплекс позволяет, как прогнозировать (на основе метеорологических данных прогностических моделей), так и исследовать произошедшие в прошлом выносы примесей на основе ре-анализа метеорологических данных, спутниковой информации и данных наземных наблюдений.

Для просмотра и анализа метеорологических данных, выбора координат домена, установки параметров модели и источников в программном обеспечении используются специальные интерфейсы.

Пре-процессор определяет потенциальные источники пыли в выбранном регионе и модифицирует *CONTROL* файл.

Для расчета переноса твердых частиц, содержащих тяжелые металлы, в разделе «In-Line Special Conversion Modules» необходимо активировать кнопку Dust. В зависимости от решаемой задачи следует выставить и другие параметры.

Программный комплекс позволяет моделировать подъем, перенос, сухое и влажное выпадение как аэрозольных, так и газообразных примесей. Модель включает возможность расчета переноса радиоактивных частиц (цезий-137 и иридий-131). Для аэрозольных частиц задаются диаметр, плотность и форма частиц, скорость выпадения, молекулярный вес. Для радиоактивных частиц задается период полураспада в днях. Учитывается повторный подъем примесей с подстилающей поверхности.

#### **Результаты моделирования по модели HYSPLIT\_48**

Одним из основных входных параметров при моделировании дальнего переноса и выпадения загрязняющих веществ является метеорологическая информация. Количественные оценки концентраций и выпадений в большой степени определяются качеством метеорологических данных. Моделирование тяжелых металлов требует большого набора метеорологических параметров.

В качестве входных метеорологических параметров использовались данные ре-анализа из архива NCEP/NCAR Reanalysis Data Archive. Качество данных архива обеспечивается за счет использования натуральных наблюдений, натурные и расчетные данные обрабатываются по единой методике ассимиляции для всего ряда. Архив содержит метеорологическую информацию, начиная с 1948 года. Метеорологические данные доступны на сайте <http://ready.arl.noaa.gov/archives.php> в формате, удобном для использования в модели HYSPLIT\_48. Архив обновляется в конце каждого года. Имя файла в архиве имеет следующий синтаксис:

$R\{S|P\}\{YEAR\}\{MONTH\}.\{gbl\}$ ,

где R – данные ре-анализа, S или P указывают на вертикальное распределение данных в  $\sigma$ -координатах или изобарических поверхностях, соответственно YEAR – год, MONTH – месяц, gbl – глобальные данные. Пример RP200703.gbl.

Данные для изобарических уровней получены из Центра диагностики климата NOAA-CIRES (США, Колорадо). Метеорологические па-

раметры даны в узлах глобальной долготно-широтной сетки с пространственным шагом  $2,5^\circ$  и имеют  $144 \times 73$  точки, временной шаг составляет 6 часов. Изобарические поверхности (ГПа) – 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10.

Повторный ветровой подъем тяжелых металлов (ТМ) с почвы сильно зависит от типа подстилающей поверхности. В модели HYSPLIT\_48 информация о типах поверхностей находится в файле «Landuse.ASC» и содержит следующие типы: 1 – городская территория; 2 – сельскохозяйственные угодья; 3 – засушливые области; 4 – лиственные леса; 5 – хвойные леса; 6 – смешанные леса; 7 – водная поверхность; 8 – пустыни; 9 – болота; 10 – смешанные области; 11 – каменистые области.

Основными источниками вторичного подъема частиц являются пустыни и засушливые области. Центральная Азия характеризуется песчаными почвами. Для оценки эмиссии тяжелых металлов на частицах пыли для территории Казахстана, Центральной Азии и оставшейся части расчетной области использовалась концентрация свинца 15 мг/кг. По данным Центра экологического мониторинга окружающей среды Республики Казахстан концентрация свинца в почве на территории г. Астаны в весенний период 2007 г. изменялась от 17,1 до 31,4 мг/кг, среднее значение 22,4 мг/кг. Для полноценной оценки модельных расчетов, необходимо развитие системы фоновоего мониторинга в Казахстане.

Входные данные о распределении источников эмиссии свинца, кадмия и ртути по территории Казахстана определялись на основе карт, опубликованных в отчетах Метеорологического синтезирующего центра «Восток» (<http://www.msceast.org/countries/index.html>) [3, 4]. На рис. 1 представлено пространственное моделирование выпадений свинца, рассчитанное по модели HYSPLIT\_48.

Промежуточные модельные расчеты концентрации и выпадения свинца в Казахстане указывают на явно выраженный сезонный ход, достигая максимума зимой и минимума летом. Преобладает перенос в северном и западном направлениях. В других направлениях регион Центральной Азии окружен горными хребтами, ограничивающими атмосферный перенос. Результаты моделирования за весь год показывают, что в основном выпадения свинца происходят на территорию Казахстана, России и Узбекистана, а также концентрируются вдоль восточной границы Казахстана.

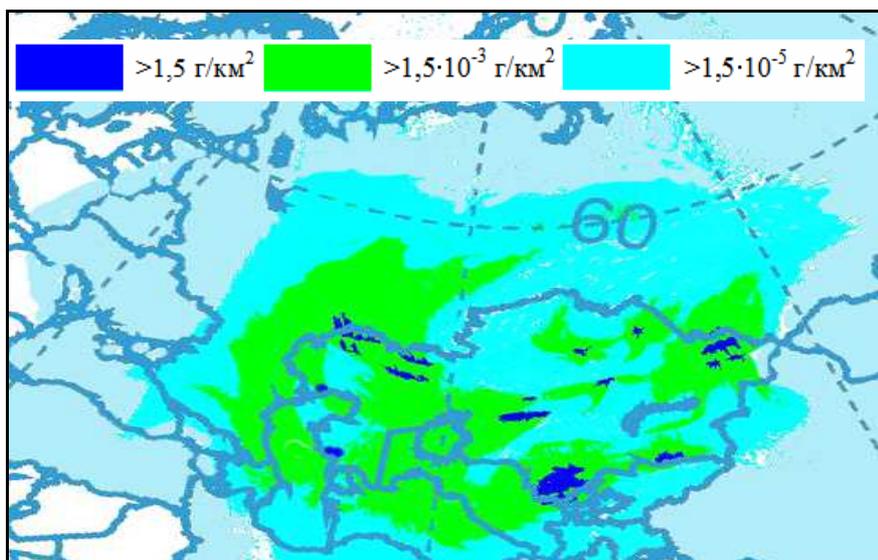
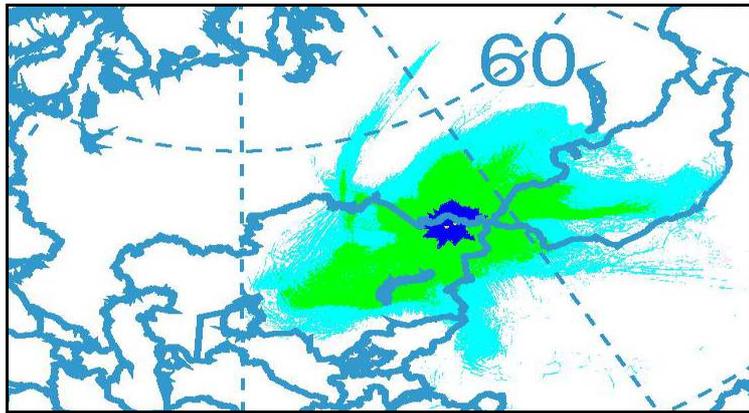


Рис. 1. Пространственное распределение выпадений свинца от антропогенных источников Казахстана в 2007 г., рассчитанное по модели HYSPLIT\_48.

На основе собранных данных по предприятиям Казахстана за 2007...2008 гг. также было проведено моделирование трансграничного переноса ТМ (свинец) и СОЗ (Бенз[а]пирен) от выбросов крупного точечного источника, расположенного в Восточно-Казахстанской области (УК МК АО КАЗЦИНК г. Усть-Каменогорск). Результаты моделирования показали сильную зависимость выпадений ТМ и СОЗ от условий атмосферной циркуляции в течение месяца. Распределение выпадений свинца по территории в меньшей степени зависит от величины выбросов, чем от синоптических условий и преобладающего направления переноса воздушных потоков в атмосфере. Распространение выбросов ТМ и СОЗ от рассматриваемого источника происходит на сотни километров.

На рис. 2...4, полученных в результате моделирования выпадений свинца с помощью модели HYSPLIT\_48 из источника, расположенного в Восточно-Казахстанской области, видно, что территория распространения загрязнения в основном определяется характером атмосферной циркуляции. Наибольшее распространение области выпадения свинца на территории России и Монголии наблюдается в октябре и апреле, то есть в переходные сезоны года. Наименьший размер территории, охваченной загрязнением, отмечается в июле, так как летом над исследуемой территорией преобладает малоградиентное поле атмосферного давления и скорости ветра небольшие.



Рису. 2. Суммарное выпадение свинца на соседние страны от УК МК АО КАЗЦИНК в апреле 2008 г. (Условные обозначения см. рис. 1).

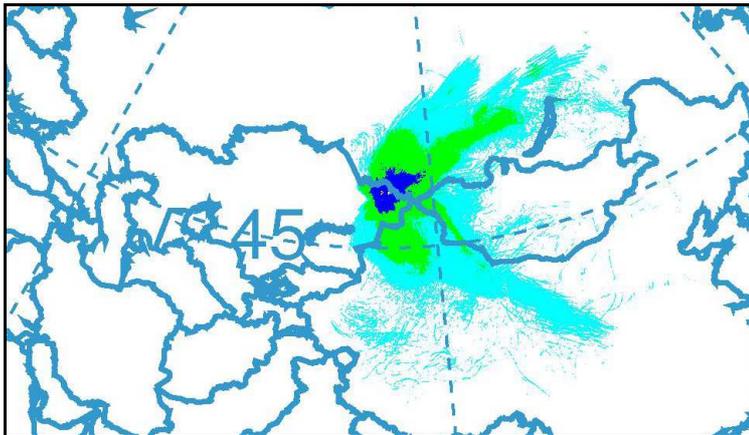


Рис. 3. Суммарное выпадение свинца на соседние страны от УК МК АО КАЗЦИНК в июле 2008 г. (Условные обозначения см. рис. 1).

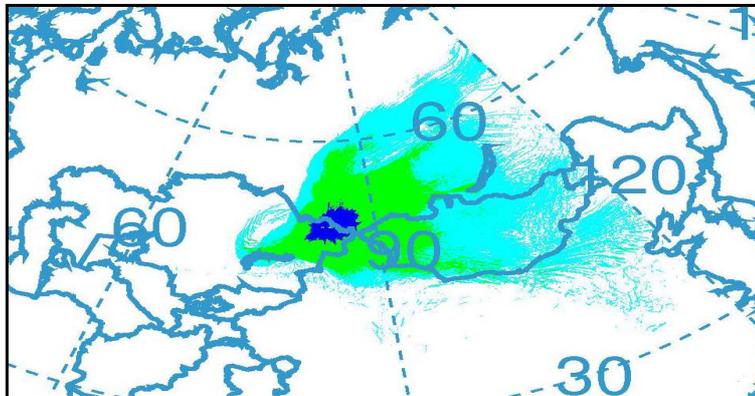


Рис. 4. Суммарное выпадение свинца на соседние страны от УК МК АО КАЗЦИНК в октябре 2008 г. (Условные обозначения см. рис. 1).

Для проведения расчетов с использованием программного комплекса HYSPLIT\_48 были определены координаты центра каждого квадрата, источники считались площадными, размером 50×50 км. Судя по опубликованным статистическим данным, суммарные выбросы свинца по Казахстану в 2008 г. фактически составили 1355 т, в 2007 г. – 1338 т.

Зоны самых высоких выпадений свинца от антропогенных источников Казахстана расположены на северо-западе, востоке, юге и центре Казахстана, что обусловлено расположением там крупных национальных источников. Как видно из данных расчетов по модели, перенос в северном, западном и юго-западном направлении проявляется более выражено, чем в юго-восточном. Это связано с тем, что в южной части страны располагаются горные массивы, препятствующие переносу воздушных масс.

Из общей эмиссии свинца в Казахстане в 2007 г., 527 т выпало на территорию самого Казахстана, около 811 т (примерно 60 %) были вовлечены в трансграничный перенос. На территорию России выпало около 430 т, на Кыргызстан – 45 т, 35 т – на Узбекистан. Более 190 т было вынесено за пределы расчетного домена.

Результаты исследования могут быть использованы для принятия решений в области улучшения управления качеством атмосферного воздуха в Казахстане. Они также позволят улучшить систему мониторинга качества воздуха, выявить основные траектории переноса загрязняющих веществ, оценить дальность и массу выноса в зависимости от сезонов года и орографических особенностей территории. Кроме того, модель позволяет решать «обратные задачи» по установлению источников выбросов, например, в случае трансграничных аварий и по данным измерений концентрации загрязняющих веществ определять массу выброса загрязняющих веществ с территории сопредельных государств. Однако, моделирование трансграничных потоков загрязняющих веществ в Казахстане ограничено отсутствием надежных данных и детальных отчетов по выбросам. Улучшение мониторинга и отчетности по выбросам ЗВ, ТМ и СО<sub>2</sub> в Казахстане даст возможность получать более надежные оценки трансграничного переноса загрязнений в атмосфере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипкин О.П., Каипов И. В., Сагатдинова Г.Н. Мониторинг пыльных бурь Приаралья с использованием космических данных и моделирования: Тез. докл. / Шестая всероссийская открытая ежегодная конференция ИКИ РАН «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М: 2008. – С. 54-58.

2. Архипкин О.П., Каипов И.В., Сагатдинова Г.Н. Мониторинг пыльных бурь Приаралья с использованием данных ДЗЗ: Тез. докл. / Казахстанско-украинская конференция «Современные космические технологии». – Алматы: 2008. – С. 43-45.
3. Виноградова А.А., Егоров В.А.. О возможностях дальнего атмосферного переноса загрязнений в Российскую Арктику. // Изв. АН ФАО. – 1996. – Т. 32. № 6. – С. 796-802.
4. Гальперин М.В., Софиев М., Гусев А., Афиногенова О. Подходы к моделированию трансграничного загрязнения атмосферы Европы тяжелыми металлами: отчет ЕМЕП/МСЦ-В. – М. – 1995. – № 7/95. – 85 с.
5. Draxler, R.R. Forecasting dust storms using HYSPLIT/ The Sino-US Workshop on Dust Storms and Their Effects on Human Health, November 25-26, 2002, Raleigh, North Carolina.
6. Meteorological overview and verification of HYSPLIT and AAQFS dust forecasts for the dust storm of 22-24 October 2002 A.G. Wainl et all. Bureau of Meteorology Research Centre, Australia January 2006.

Институт космических исследований, г. Алматы  
КазНИИЭК, г. Алматы

### **ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ АУА ЛАСТАНУЫНЫҢ ТРАНСШЕКАРАЛЫҚ ТАСЫМАЛЫН HYSPLIT\_48 ПРОГРАММАЛЫҚ КЕШЕНІ КӨМЕГІМЕН МОДЕЛДЕУ**

И.В. Каипов

Геогр. ғылымд. канд. И.Б. Есеркепова

*Ауадағы ластаушы заттардың трансшекаралық тасымалын моделдеу үшін HYSPLIT\_48 программалық кешенін Қазақстанда қолдану мүмкіншіліктері келтірілген. Ауыр металдар мен берік органикалық ластаушылардың Қазақстан аумағына және көрші мемлекеттерге түсу салмағы бағаланды. Бұл программалық кешен, үлкен қашықтықта ауаның трансшекаралық ластануы туралы БҰҰ Еуропалық экономикалық комиссиясының Конвенциясы шегінде Қазақстандағы ластаушы заттардың трансшекаралық тасымалын бағалаудағы құрал болып табылатындығына қорытынды жасалынған.*