

УДК 519.713; 519.711:53

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕСЧАНО-СОЛЕВЫХ  
БУРЬ С ОСУШЕННОГО ДНА АРАЛЬСКОГО МОРЯ.**Доктор техн. наук  
Канд. геогр. наукЭ.А. Закарин  
А.Х. Ахмеджанов  
Т.В. Дедова  
Н.Х. Каздаев

*В составе геоинформационной системы разработан блок математического моделирования процессов возникновения и развития песчано-солевых бурь с использованием данных космического зондирования. Система реализована на графической станции "SUN" в среде программного обеспечения Arc/Info.*

Одним из опасных природных явлений являются пыльные бури, выносящие в атмосферу большое количество мелкодисперсного песка и частиц соли с осушенного дна Аральского моря. Образовавшийся атмосферный аэрозоль не только опасен для здоровья человека, но и вносит существенные коррективы в термодинамику воздушных масс.

Динамика выноса атмосферного аэрозоля исследуется в основном методами гидродинамического моделирования. Основные проблемы моделирования аэрозольной атмосферной динамики изложены в /6/.

Перенос африканской пыли, наблюдавшийся над западной частью Средиземного моря, в начале июня 1985 г. описан в /10/ с помощью модели аэрозольной пустыни с применением данных спутника Meteosat. Результаты исследования термоконвективных выносов аридного аэрозоля в Черных землях Калмыкии изложены в /1, 5/, изучению переноса аэрозолей в Сибири посвящены работы /9/. Описание стационарной двумерной задачи динамики пыльных бурь в Приаралье с изложением результатов моделирования дано в /4/.

С применением гидродинамического расчета ветрового режима в /8/ определяется скорость потока, при котором могут образовываться пыльные вихри, способствующие выносу примеси в атмосферу.

В настоящее время ведутся работы по созданию системы мониторинга пыльных бурь с осушенного дна Аральского моря, основные принципы которого изложены в /7/. Одним из компонентов этой системы является математическое моделирование пыльных бурь.

*Условия переноса мелкодисперсного песка и частиц соли из поверхностного слоя в несущий воздушный поток.*

Песчано-солевые бури являются результатом взаимодействия воздушного потока большой скорости с деятельной земной поверхностью, поэтому зависят от большого числа параметров, характеризующих как атмосферу, так и подстилающую поверхность.

Процесс дефляции (выветривания) песчаной и солевой поверхности может возникнуть лишь при превышении некоторой критической пороговой скорости ветра, которую можно рассматривать как условие существования двухфазного потока, представляющего собой газовый поток, несущий частицы твердой фазы. Изучение этого вопроса проводилось многими исследователями, как в естественных условиях, так и в лабораторных.

Процесс переноса песка и соли происходит в трех видах: перекачивание частиц по поверхности массива песка и соли, посредством так называемой сальтации, т.е. подъемов и падения, а также под воздействием турбулентной диффузии.

Перенос в виде перекачивания и сальтации имеет место в тонком слое у поверхности земли, к тому же в начальном этапе пыльной бури. Вынос частиц песка и соли в атмосферу может производиться в основном под воздействием турбулентной диффузией.

Экспериментальные данные показали, что сальтация происходит в следующих пределах

$$10^{-2} < u_*^2 (\sigma \cdot g \cdot d) < 1, \quad (1)$$

где  $u_*$  — динамическая скорость движения ветропесчаного потока,  $\sigma = \rho_n / \rho_n$  — превышение плотности частиц песка и соли над плотностью воздуха,  $g$  — ускорение свободного падения,  $d$  — диаметр частиц.

Критическая скорость  $u_*$  зависит от крупности вовлекаемых в движение частиц пыли и соли и меняется в диапазоне от 0,14 м/с до 0,30 м/с при изменении размеров частиц от 50 до 400 мкм по данным эксперимента /4/.

Частицы песка и соли могут оказаться во взвешенном состоянии при выполнении следующего условия:

$$\chi \cdot u_x / u_g > 1, \quad (2)$$

где  $\chi$  - постоянная Кармана,  $u_g$  - скорость осаждения частиц.

Задание скорости осаждения частиц песка и соли осложнено характером динамического взаимодействия примеси воздушного потока и состоянием песчано-солевой поверхности. Это взаимодействие зависит от плотности и размеров этих частиц. По данным анализа состава песков рассматриваемого региона, приведенных в /4/, преобладающей фракцией (90%) являются частицы диаметром от 50 до 250 мкм. Функции распределения по размерам либо близки к логарифмически нормальным, либо к нормальным. Внешним факторам, определяющим взаимодействие воздушных потоков и подстилающей поверхности являются скорость воздушного потока. В /2/ показано, что скорость гравитационного осаждения меняется от 0,01 до 0,72 м/с при размерах частиц от 10 до 100 мкм.

Одним из главных условий перехода поземки в пыльную бурю является, согласно /4/, следующее неравенство:

$$u_x \geq 0,4 u_g \quad (3)$$

На относительно мелком песке (средним размером  $x_0 = 100$  мкм,  $u_g = 0,72$  м/с) при сухом состоянии поверхности поземка переходит в пыльную бурю при динамической скорости  $u_x = 0,29$  м/с. Этот переход для крупного песка ( $x_0 = 220$  мкм,  $u_g = 1,7$  м/с) будет наблюдаться при  $u_x = 0,68$  м/с. Если частицы песка поднимаются выше уровня 10 м, то для крупного песка  $u_x = 0,97$  м/с, что соответствует средней скорости 22 м/с.

При выполнении последнего условия возможен отрыв частиц пыли и соли из нижнего поверхностного слоя вследствие турбулентной диффузии и дальнейший перенос взвешенных частиц в воздушном потоке, что позволяет рассматривать этот процесс, как атмосферную диффузию мелкодисперсной тяжелой примеси.

*Решение задачи нестационарной трехмерной турбулентной диффузии тяжелой примеси в атмосфере.*

Уравнение турбулентной диффузии тяжелой примеси запишется в следующем виде

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + (w - u_z) \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где  $S$  - объемная концентрация пыли и соли, (кг/м<sup>3</sup>)

$u, v, w$  - составляющие скорости ветра, (м/с)

$K$  - коэффициент турбулентной диффузии (м<sup>2</sup>/с).

Начальными и граничными условиями для значений объемной концентрации  $S$  будут:

$$\begin{aligned} S(x, y, z, 0) &= 0 & \text{при } z > z_0 \\ S(0, y, z, t) &= 0 & \text{при } x = 0 \\ S(x, 0, z, t) &= 0 & \text{при } y = 0 \\ S(x, y, H, t) &= 0 & \text{при } z = H, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $H$  - граница по координате  $z$ .

$$S(x, y, z_0, t) = S_0(x, y) \quad \text{при } z = z_0, \quad (6)$$

если источник постоянно действующий. Здесь высота  $z_0$  - минимальная высота, при которой можно считать, что скорости воздушного потока и вовлекаемых в движение частиц песка и соли совпадают. Согласно /4/  $z_0 = 0,5$  м.

Особую задачу представляет собой задание функции  $S_0(x, y)$ , описывающую концентрацию примеси на высоте  $z_0$  над очагами пыльных бурь при условии постоянства расхода мелкодисперсной пыли.

Интенсивность потока и спектр частиц поднимаемых в атмосферу зависит как от свойств подстилающей поверхности, так и механизмов, формирующих вынос. Оценка пылевых выносов в Приаралье может быть получена на основе данных по концентрации аэрозоля над участками с различной степенью зарастания. Вынос примеси над заросшими участками много меньше, чем над свободным от растительности мелкодисперсным песком. Поэтому среднюю концентрацию частиц  $S$  можно оценить по формуле:

$$S = qf/u, \quad (7)$$

где  $S$  - объемная концентрация примеси в атмосфере,  $u$  - характерная скорость воздушно-песчаной смеси,  $f$  - коэффициент, учитывающий зарастание песчаных массивов.

Последний коэффициент может изменяться от 0 до 1, причем  $f=1$ , где песчаный массив без какой-либо растительности, и уменьшается в зависимости от зарастания.

В /4/ имеются данные твердого расхода  $q$  и значение динамической скорости на разных высотах, что позволяет по формуле (7) определить значение объемной концентрации на высоте выхода частиц из уровня поземки. Этим самым будет обеспечено задание нижнего граничного условия. По данным 1986 г. при динамической скорости 0,30 м/с на высоте 0,5 м значение твердого расхода составляло  $4,3 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>2</sup>с. согласно /4/ концентрация на высоте 0,5 м в среднем равнялась  $2,10 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> на песчаном массиве без растительности. Источник может быть как постоянно действующим, так и ограниченным по времени. При прохождении выноса примеси над акваторией моря над поверхностью воды ее концентрация будет равна нулю.

Входными параметрами рассматриваемого уравнения атмосферной диффузии является три составляющих скорости ветра и коэффициент турбулентности. При численном интегрировании уравнений, описывающих процессы распространения в атмосфере, целесообразно использовать неявные схемы, в которых производные по пространству аппроксимируются с учетом направления переноса.

В конечных разностях уравнение (4) может быть представлено в следующем виде:

$$aS_{y_{k-1}}^{n+1} + bS_{y_k}^{n+1} + cS_{y_{k+1}}^{n+1} = d \quad (8)$$

где

$$a = \left( w - u_x - \frac{\partial K}{\partial z} - \frac{K}{\partial z} \right) \frac{dt}{dz},$$

$$b = 1 + \frac{udt}{dx} + \frac{vdt}{dy} + \left( w - u_x + \frac{2K}{\partial z} - \frac{\partial K}{\partial z} \right) \frac{dt}{dz},$$

$$c = -\frac{Kdt}{dz^2},$$

$$d = S_{y_k}^n + S_{x-1, y}^{n+1} \frac{udt}{dx} + S_{y-1, x}^{n+1} \frac{vdt}{dy}$$

Для решения уравнения (8) был применен метод прогонки, в котором на первом этапе определяются прогоночные коэффициенты согласно следующим рекуррентным формулам:

$$\begin{cases} l_k = -c/(b + a \cdot l_{k-1}) \\ f_k = (d - a \cdot f_{k-1})/(b + a \cdot l_{k-1}) \end{cases} \quad k = (2, K-1)$$

$$l_1 = 0, \quad f_1 = S_{y_0}$$

На втором этапе определялись значения искомой функции распределения концентрации примеси с учетом условия на верхней границе:

$$S_{jk}^{n+1} = l_k \cdot S_{jk+1}^{n+1} + f_{k-1}, \quad k = (K, 2, -1) \quad (9)$$

Условием устойчивости и сходимости схемы (8-9) является следующее неравенство (хорошей обусловленности задачи):

$$|b| > |a| + |c| + \delta, \quad \text{где } \delta > 0 \quad (10)$$

### *Модель турбулентного пограничного слоя атмосферы.*

Одним из первых вариантов расчетов распределения концентраций примеси был выполнен в приземном слое атмосферы высотой до 100 м. Важной особенностью этого слоя является относительное постоянство по высоте турбулентных потоков и именно здесь наблюдаются максимальные градиенты метеозлементов. Из всех трех состояний приземного слоя (устойчивой, безразличной и неустойчивой температурной стратификации) наиболее вероятным является условие безразличной стратификации и необходимые величины могут быть записаны в следующем виде:

$$u = \frac{u_*}{\chi} \cdot \ln(z/z_0) \cdot \cos \varphi, \quad v = \frac{u_*}{\chi} \cdot \ln(z/z_0) \cdot \sin \varphi, \quad w = 0, \quad K = \chi \cdot u_* \cdot z \quad (11)$$

где  $z_0$  - параметр шероховатости подстилающей поверхности,  $\varphi$  - направление ветра, определяемый для выбранной системы координат по данным метеостанций.

Процессы, происходящие в приземном слое атмосферы, тесно связаны с процессами во всем пограничном слое атмосферы (высота до 2 км), поэтому необходимо именно в нем проводить расчеты выноса мелкодисперсного песка и соли в атмосферу. При решении задачи распределения метеозлементов рассматривалась общепринятая в последние годы система уравнений пограничного слоя атмосферы, подробно описанной в [3], с применением уравнения баланса турбулентной энергии и соотношения подобия для коэффициента турбулентности. На уровне шероховатости земной поверхности соблюдалось условие прилипания, а верхним граничным условием было совпадение скорости ветра с геострофическим на высоте пограничного слоя атмосферы.

Предполагая, что процесс установления метеорологического режима происходит достаточно длительно, можно считать, что в пределах пограничного слоя атмосферы сформировались

определенные профили метеоэлементов, поэтому режим движения воздушных потоков можно считать квазистационарным. Внутри пограничного слоя вертикальные градиенты метеоэлементов значительно больше горизонтальных, поэтому во многих случаях предполагается зависимость метеоэлементов только от вертикальной координаты.

При сформулированных допущениях система имеет следующий вид:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial u}{\partial x} \right) + fv; \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial v}{\partial x} \right) + f(u - G); \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \\ u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right); \\ u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_q \frac{\partial q}{\partial z} \right); \end{cases} \quad (12)$$

где  $u, v, w$  — компоненты скорости ветра вдоль координат осей  $x, y, z$ ;  $\theta$  — потенциальная температура;  $q$  — удельный вес;  $f$  — параметр Кориолиса;  $G$  — величина скорости геострофического ветра;  $K, K_{\theta}, K_q$  — коэффициенты турбулентного обмена соответственно для количества движения, теплоты и влаги. Для упрощения задачи натекающий поток может быть направлен по направлению оси  $OX$ .

Система (12) незамкнута относительно  $K, K_{\theta}, K_q$ . С определенной погрешностью можем считать, что  $K_{\theta} = K, K_q = K$ . Для определения коэффициентов турбулентного обмена примем схему замыкания с использованием дифференциального уравнения баланса кинетической энергии турбулентности ( $b$ ) и соотношения подсебя.

$$\begin{cases} u \frac{\partial b}{\partial x} + w \frac{\partial b}{\partial z} = K \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - c \frac{b^2}{K} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial b}{\partial z} \right); \\ K = l \sqrt{b}, \quad l = -\chi c^{\frac{1}{2}} \frac{b/K}{\frac{\partial(b/K)}{\partial z}}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $l$  — линейный масштаб турбулентности,  $c$  — постоянная величина,  $\chi$  — постоянная Кармана.

На уровне шероховатости  $z_0$  предположим выполнение условия:

$$u = 0, v = 0, w = 0, \theta = \theta_0, q = q_0, \partial b / \partial z = 0 \text{ при } z = z_0$$

На верхней границе пограничного слоя ( $H$ ) турбулентность отсутствует и скорость ветра должна совпадать с геострофической.

$$u = G, v = 0, w = 0, \text{ при } z = z_0$$

$$\text{а также } \theta = \theta_r, q = q_r, b = 0 \text{ при } z = H.$$

На боковой поверхности  $x=0$  были заданы профили всех метеозлементов, соответствующих натекающему потоку.

Реализация системы (12-13) с указаниями граничных условий, проводилось методом прогонки, который был описан выше.

***Схема вычисления объемной концентрации мелкодисперсного песка и соли в процессе пыльной бури в составе ГИС.***

Общая схема расчета распределения концентрации состоит из подготовки входных данных, самого расчета и сопоставления с данными космического зондирования выходных данных (рис. 1).

Входными данными являются информация об очагах и профили метеорологических элементов. Информация об очагах представляет собой геоботанические и геофизические карты с указанием на них зон (массивов) песка и соли, способных при возникновении пыльной бури быть перенесенными в атмосферу. В первую очередь эти географические карты преобразуются в цифровой вид. То есть информация преобразуется в электронную карту очагов с наличием необходимой атрибутики по источникам (интенсивность, вид и тип источника и пр.) при помощи средств программного обеспечения ГИС ARC/INFO. Далее с применением возможностей модуля GRID векторная информация преобразуется в растровый файл (grid-файл), базирующийся на регулярной сетке с помощью команды POLYGRID. В свою очередь эти растровые данные конвертируются в текстовый формат (ASCII-файл) – командой GRIDASCII. В этом виде они уже могут быть использованы в расчетной модели. Метеорологические данные станций сети Казгидромета могут быть проанализированы, проинтерполированы и перенесены на регулярную сетку. Если есть данные вертикального зондирования атмосферы, то могут быть построены вертикальные профили необходимых метеорологических элементов. При отсутствии данных станций вертикальные профили могут быть рассчитаны при определенных допущениях.



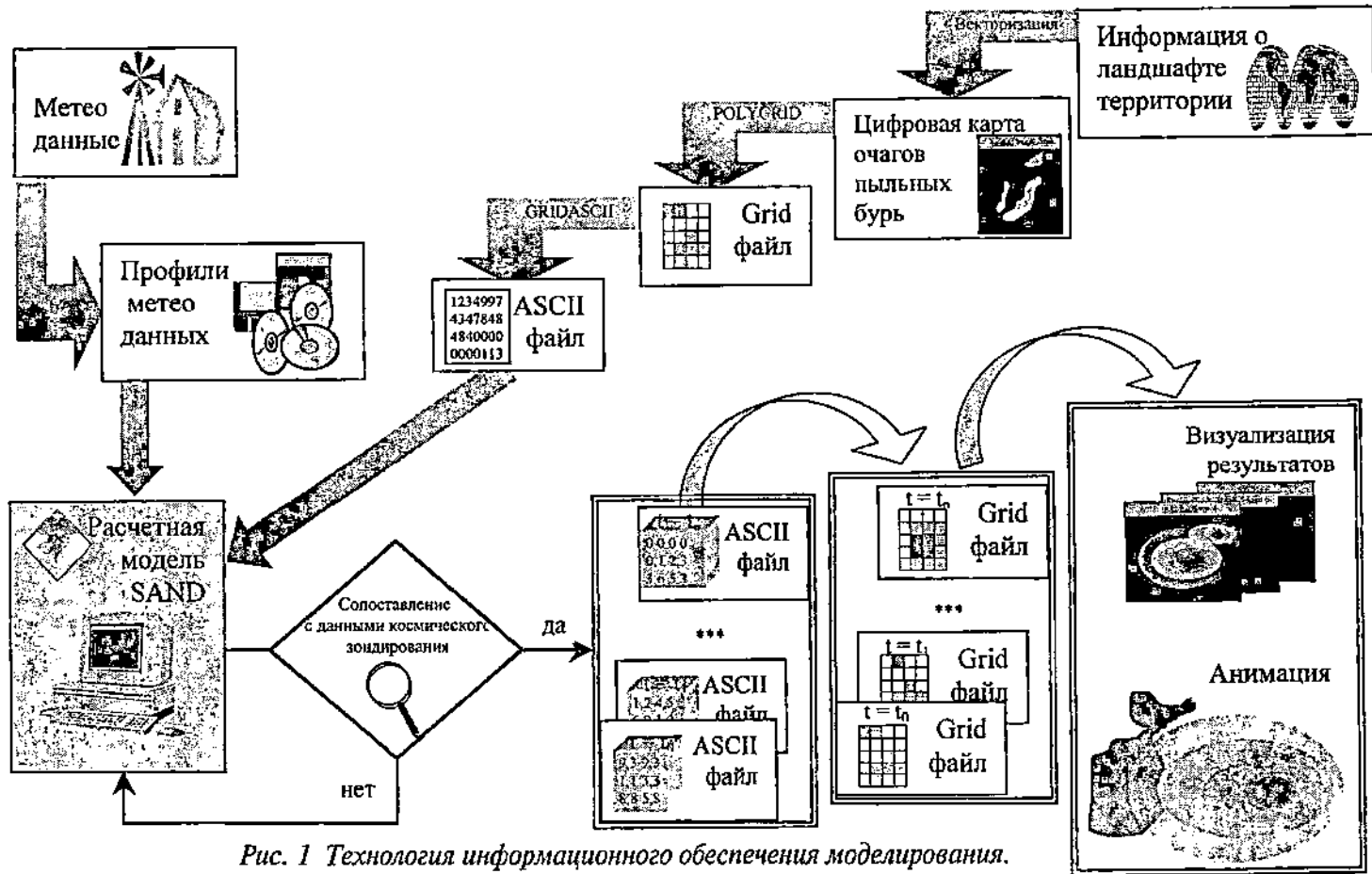


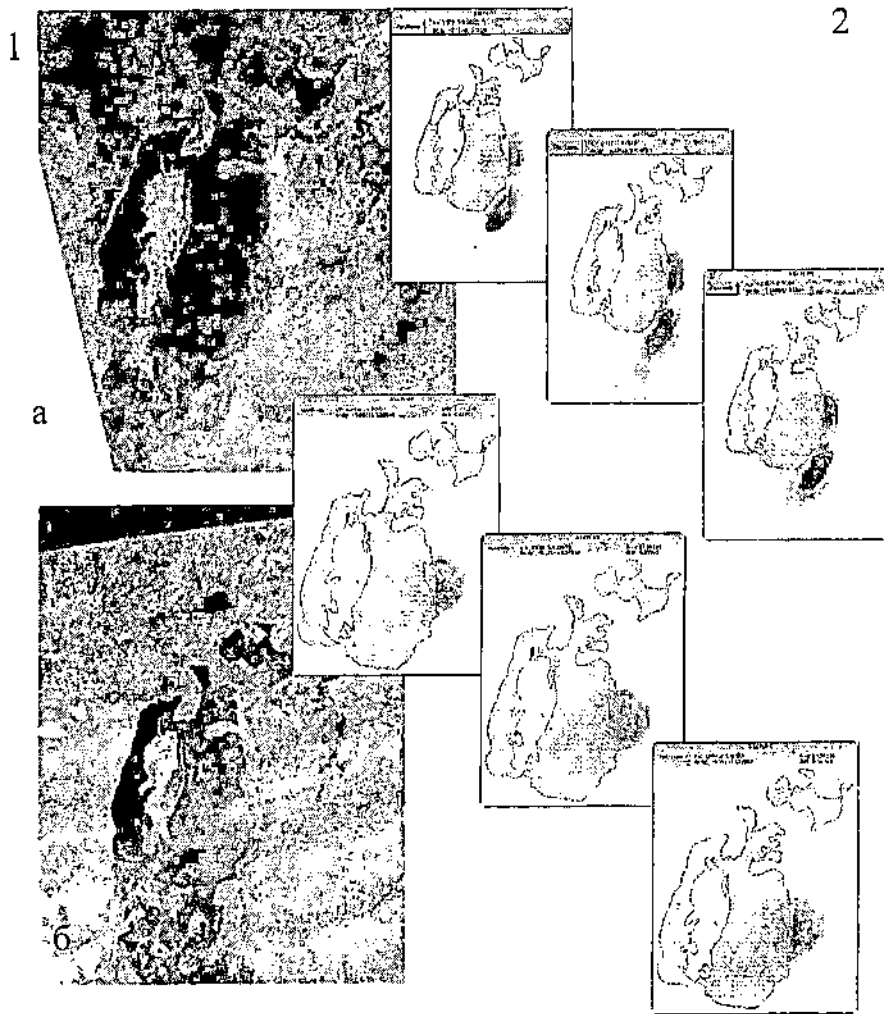
Рис. 1 Технология информационного обеспечения моделирования.

Данные метеорологических станций Приаралья накапливаются в банке метеоданных ГИС «Арал». Расчетная схема реализована на сетке 90×111 ячеек. Размер каждой ячейки 5000 м. По высоте количество шагов ограничивалось исходя из оптимальности машинного времени, а шаги по высоте и по времени варьировались в зависимости от условия устойчивости и сходимости счета.

Первичные результаты счета представляют собой набор матриц значений представленных в текстовом формате (формат ASCII). Указанная матрица представляет собой набор географически определенных данных, каждое из которых распространяется на единичную ячейку расчетной области. Далее они преобразуются в Grid файлы. Данное преобразование осуществляется с помощью команды ARCINFO – ASCIIGRID, после выполнения которой по отношению ко всему ряду текстовых файлов мы получаем набор Grid файлов.

В свою очередь набор Grid файлов может быть преобразован в векторный вид или в набор электронных карт объемной концентрации песка и соли на каждый момент времени, показывающий распределение примеси, динамически изменяющееся во время пыльных бурь. И с помощью инструментов визуализации создается анимационная картина образования шлейфа переноса примеси.

В процессе численного эксперимента были проведены сопоставления с данными космического зондирования. По обнаруженным на космоснимках 18.05.98 г. и 18.09.98 г. шлейфа песчано-солевых бурь с осушенного дна Аральского моря был поставлен численный эксперимент по восстановлению шлейфа (рис. 2).



1. Снимки со спутника NOAA с видимым шлейфом выноса песка и соли с осушенного дна Аральского моря: а) 18 мая 1998 г.; б) 18 сентября 1998 г.
2. Результаты моделирования распределения массовой концентрации аэрозоля в атмосфере на территории Приаралья.

Рис. 2 Сопоставление с данными космического зондирования

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алоян А.Е., Андропова А.В., Арутюнян В.О. и др. Эмиссия и перенос почвенных частиц в аридных регионах (Калмыкия, Приаралье) // Тез. Конф. Физика

- атмосферного аэрозоля – М.: 12-17 апреля 1999 г. – С. 17-18.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. -Л.: Гидрометиздат, 1975 г.- 447с.
  3. Вагер Б.Г., Надежина Е.Д. Пограничный слой атмосферы в условиях горизонтальной неоднородности. -Л.: Гидрометиздат, 1979 г.-135с.
  4. Гидрометеорологические проблемы Приаралья /Под ред. Г.Н. Чичасова. -Л.: Гидрометиздат, 1990 г. - 277с.
  5. Голицын Г.С., Гранберг И.Г., Алоян А.Е. и др. Исследования термоконвективных выносов аридного аэрозоля в Черных землях Калмыкии. // Естественные и антропогенные аэрозоли. - СПб.: 29.09-04.10 1997г. - С. 342-356
  6. Домнин П.И. о проблемах моделирования аэрозольной атмосферной динамики. // Естественные и антропогенные аэрозоли. – СПб.: 29.09-04.10 1997г. - С. 349-356
  7. Закарин Э.А., Семенов О.Е. Проблема мониторинга пыльных бурь Приаралья – экспедиционный и космический компоненты наблюдательной системы // Тез. Конф. Физика атмосферного аэрозоля – М.: 12-17 апреля 1999 г. – С. 118
  8. Курбаткин В.П., Филиппов С.Б. Способы управления солепереносом // Проблемы освоения пустынь. - 1998 г. – Вып. 3-4.-С. 45-49
  9. Ривин Г.С., Воронина П.В. Имитационное моделирование переноса аэрозолей в Сибирском регионе: методы и численный эксперимент. // Естественные и антропогенные аэрозоли. – СПб.: 29.09-04.10 1997г. - с. 357-361
  10. Dulac F., Takre D., Bermametti G., Buat-Menard P., Desbois M., Sutton D. Assessment of the African airborne dust mass over The Western Mediterranean sea using Meteosat data. // J. Geophysical Res. D. – 1992- 97, №2.- P. 2489-2506

Институт космических исследований

Министерство Образования и Науки Республики Казахстан

**АРАЛ ТЕҢІЗІНІҢ ҚҰРҒАҚТАЛҒАН ТҮБІНЕН  
ШЫҒАТЫН ҚҰМ-ТҮЗДЫ БОРАНДАРДЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ  
ҮЛГІСІН ЖАСАУ**

Тех.ғыл.докторы	Ә.А.Закарин
Геогр.ғыл.канд.	А.Х.Ахмеджанов
	Т.В. Дедова
	Н.Х.Каздаев

Ғарышты зондану мәліметтерін қолдана отырып құм-тұзды борандардың пайда болуы және даму процесстерінің математикалық үлгісі геоинформациалық жүйе құралында жасалынады. Жүйе Arc/Info программалық қамтамасыздандыруды пайдалана отырып “SUN” графикалық станциясы арқылы құрастырылған.