

УДК 989.5: 201

Б.Р.Нахшиниев, Т.Саго*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛИ С ВЫСОХШЕЙ АКВАТОРИИ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

(Представлено академиком АН Республики Таджикистан И.А.Абдусаломовым 18.08.2009 г.)

Аральское море оценено как одна из девяти опасных экологических зон, где здоровье и благосостояние населения резко ухудшилось в результате неблагоприятных экологических изменений [1]. Вследствие увеличения площади орошаемых земель и строительства гидроэлектростанций наряду с увеличением населения в регионе Аральское море деградировало по масштабам в самое большое внутриконтинентальное соленое озеро (с 10 г/л до 40 г/л) в мире. Уровень воды в море упал более чем на 15 м, объем воды уменьшился с 50 до 75%, сократилась поверхность моря, а площадь высохшего морского дна в настоящее время составляет более 33 000 км² [2]. Хотя эта экологическая катастрофа называется “Проблемой Аральского моря”, кризис Арала включает более широкий спектр проблем и не ограничивается лишь самим озером. Большая область периферии моря также серьезно пострадала и определяется исключительно как “Экологическая зона бедствия” [3].

Каждый год песчаные бури поднимают в атмосферу миллионы тонн солей и песков с высохшего морского дна и распространяют их на расстояние более чем сотни километров. Согласно данным Singer и др. [4], пески и пыль могут быть подняты на высоту более 4 км, разносятся по всей территории региона, а затем оседают в виде осадков и пыли.

Несмотря на эти факты, отсутствует комплексное изучение распространения и переноса пыли с высохшей акватории моря, распределения, сезонности, ее количества и направления переноса. По данному вопросу опубликован ряд статей [5-10]. Однако результаты, представленные в этих статьях, получены главным образом экспериментальным путём, а не современным методом вычислительного моделирования.

В настоящей статье представлены результаты численного моделирования распространения пыли с высохшей акватории Аральского моря, включая количество и направления переноса пыли. Сначала описывается система и обсуждаются результаты моделирования на фоне спутниковых наблюдений. Работа была выполнена на базе Лаборатории по моделированию окружающей среды Токийского университета.

Моделирование поля ветра

В странах Центральной Азии существуют национальные метеорологические станции, которые систематически проводят метеорологические наблюдения и мониторинг качества атмосферного воздуха. Несмотря на то, что станции обеспечивают наиболее реальную

формацию в пределах своих территорий, они все еще имеют большой разрыв в местах, особенно там, где необходимо выяснить концентрацию загрязнения. В связи с этим в наших следованиях в качестве потенциального источника атмосферных данных были выбраны данные NCAR (Национальный центр атмосферных исследований США), записанные в 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 ч с разрешением 2.5° широты и 2.5° долготы.

Другим наиболее важным фактором, с учетом которого можно достичь успеха в числовом моделировании атмосферного поля ветра над трехмерной топографией, является определение топографии модели как граничное условие в процессе вычисления. С этой целью мы

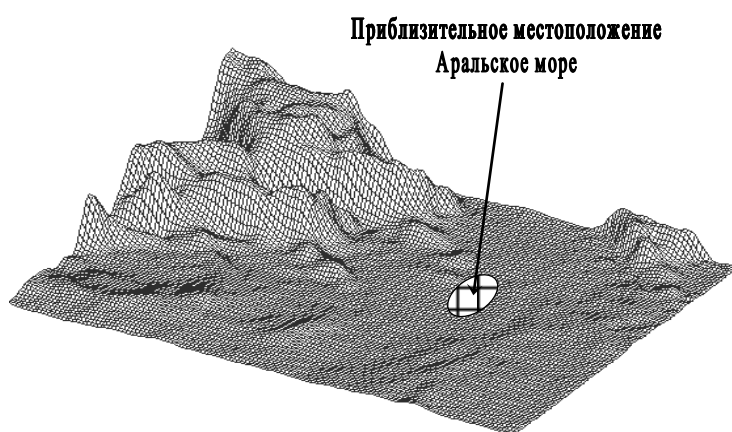


Рис.1. Моделирование рельефа местности района Аральского моря с использованием сеточного использования сеточного метода. В центре – Аральское море.

использовали сеточный метод (рис.1) с координационной системой, приспособленной к рельефу местности. Модель состоит из 143 и 110 сеток в горизонтальном (X и Y) направлении с разрешением 15 км и 30 слоев в вертикальном (Z) направлении с высотой 4 м в самом низком слое и до 2000 м в верхнем слое.

Обычно NCAR-атмосферные данные доступны в координационной системе с разрешением 2.5° широты и 2.5° долготы. Однако атмосферные данные в этой модели потребовались в координатной сети с пространственным разрешением 15×15 км.

Поэтому данные с географической координационной системы сначала были преобразованы на декартовую координационную систему и методом бикубического сплайна интерполированы на более мелкую сетку.

В вертикальном направлении рассматривался линейный логарифмический профиль ветра для того, чтобы использовать интерполированные данные и эффект шероховатости на интенсивность и направление ветра. Эти величины также зависят от атмосферной стабильности (нейтральная, стабильная и неустойчивая) поверхностного атмосферного слоя. Выше поверхностного слоя ($h_{\text{ПОВЕРХ}}$), проведена линейная интерполяция с использованием географического ветра. Логарифмический профиль ветра в вертикальном направлении дан по формуле

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left(\log \frac{z}{z_0} - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right),$$

где u_* – скорость поверхностного трения, k – безразмерный коэффициент Вон-Кармана, z_0 – высота шероховатости, z – высота, где определяется скорость ветра, и L – длина Обухова.

Значение ψ^m зависит от стабильности атмосферы.

Чтобы поддержать теорию гладкого изменения направления ветра выше поверхностного слоя, линейная интерполяция с геострофическим ветром U_G выражена следующими формулами [11]:

$$u(z) = \rho(z)u(h_{\text{ПИБЕСЧ}}) + \left[-\rho(z)\bar{U}_G, \quad h_{\text{ПИБЕСЧ}} \leq z \leq h_{\text{ГСС}}, \right.$$

где $\rho(z)$ находится по формулам

$$\rho(z) = 1 - \left(\frac{z - h_{\text{ПИБЕСЧ}}}{h_{\text{ГСС}} - h_{\text{ПИБЕСЧ}}} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{z - h_{\text{ПИБЕСЧ}}}{h_{\text{ГСС}} - h_{\text{ПИБЕСЧ}}} \right).$$

Здесь высота поверхностного слоя определена по формуле [12]:

$$h_{\text{ПИБЕСЧ}} = h_{\text{ГСС}} / 10,$$

где ($h_{\text{ГСС}}$) - высота атмосферного граничного слоя и выбрана так, что интенсивность и направление ветра всех слоев той высоты одинаковая. В заключение модель предполагает, что $u(z) = U_G$, если $z \geq h_{\text{ГСС}}$, и $u(z) = u(h_{\text{ПОВЕРХ}})$, если $z \leq h_{\text{ПОВЕРХ}}$.

Расчет вертикальной скорости ветра

Вертикальная скорость ветра - обычно не измеряемая переменная, и ее расчет до настоящего времени считается одной из самых трудных проблем для метеорологов. Однако, если данные поля ветра доступны на основе координатной сетки, расчет кинематической вертикальной скорости ветра можно получить путем интеграции уравнения непрерывности:

$$w(z) = - \int_b^z \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz.$$

Расчет геострофической скорости ветра

Геострофическая скорость ветра – это функция, которая зависит от широты, градиента атмосферного давления и плотности воздуха, которая не измеряется регулярно. Однако существуют эквивалентные способы расчета геострофической скорости ветра. По Holton [13], геострофический ветер выражен в более подходящей форме, которая имеет то преимущество, что не учитывает плотность воздуха. Используя геострофическое равновесие, геострофический ветер можно определить по формуле:

$$V_G = - \frac{g}{f} \frac{\Delta Z}{\Delta N},$$

где f – параметр Кориолиса, ΔZ – разница в высоте между соседними контурными линиями, ΔN – расстояние между контурными линиями.

Моделирование переноса пыли

С точки зрения управления качеством воздуха, наибольшая угроза человеческому здоровью представляет концентрация частиц пыли меньше $10 \mu m$. Однако, с целью получения наиболее важных особенностей пыльной бури, верхний предел размера частицы пыли в нашем исследовании равен $100 \mu m$ в диаметре. Во время вычисления движения частиц размеры диаметра частиц выбраны случайно на основе функции Гауссовского распределения вероятности со средним отклонением 50 и среднеквадратичным отклонением 60 и 10 микрон, соответственно.

N – количество частиц, выпущенных из источника каждого временного шага. Предполагается представить вертикальный поток пыли, испущенный с поверхности земли в данном временном шаге. В этой модели рассматривается только сухое гравитационное осаждение. Хотя известно, что мокрое осаждение является важным процессом, существует большая неопределенность в разработанных системах. Учитывая эти недостатки и ограничения в существующей системе, в данном исследовании не был использован процесс мокрого осаждения. Система переноса предсказывает концентрацию пыли, решая следующую систему уравнения в Лагранжевой структуре:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(m_p + \frac{\rho_f V_p}{2} \right) \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = -V_p \nabla P + m_p \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho_f S C_D \mathbf{u}_r |\mathbf{u}_r| \\ \frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}_p \end{array} \right. ,$$

где \mathbf{x}_p обозначает местоположение частицы, m_p – масса частиц, ρ_f – плотность воздуха, V_p – объем частиц, \mathbf{u}_p – скорость перемещения частиц, ∇P – градиент давления, \mathbf{g} – сила тяжести, S – поперечное сечение частиц в направлении \mathbf{u}_r , C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления, \mathbf{u}_r – относительная скорость частиц к воздуху.

Значение коэффициента аэродинамического сопротивления ($C_D(Re_p)$) зависит от режима течения воздуха вокруг частиц. Соотношение $C_D(Re_p)$ аппроксимативно было установлено, используя следующее функции:

$$C_D(Re_p) = \frac{k_1}{Re_p} + \frac{k_2}{Re_p} + k_3.$$

Число Рейнольдса частиц пыли определено по формуле:

$$Re_p = \frac{|\mathbf{u}_p - \mathbf{u}| D_p}{\nu_{air}},$$

где ν_{air} – вязкость воздуха и D_p – диаметр частиц.

Результаты моделирования

Значительное усилие было предпринято, чтобы разработать модель, которая могла бы предсказать особенности переноса пыли, испускаемой с высохшей акватории Аральского моря. Модель полностью программирована на компьютерном языке ФОРТРАН и была запущена в течение одного года (январь-декабрь 2003 г.) с временным шагом 3 ч. Мы не претендуем, что наша

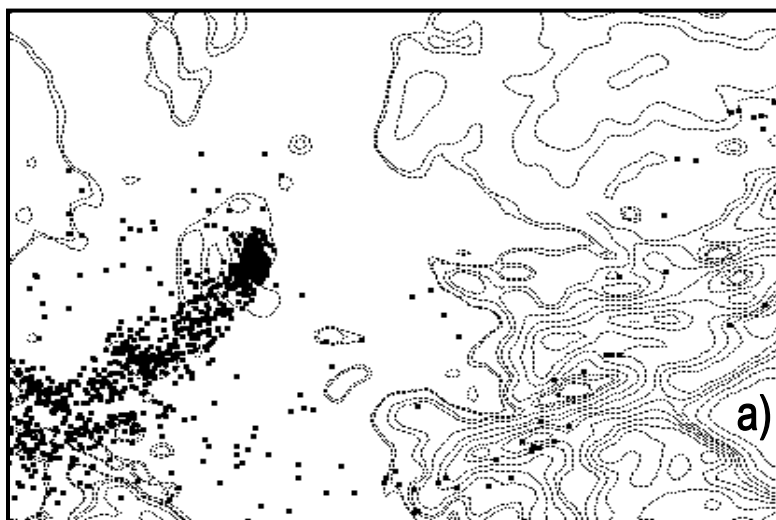


Рис.2. Пыльная буря в районе Аральского моря: а) – модель переноса пыли, построенная б) с использованием спутникового снимка NASA.

(рис.3), главной характерной особенностью поля ветра является сильный северо-восточный ветер, связанный с сильным прохладным воздушным потоком в течение почти целого дня 18

модель совершенно точно зывает перенос пыли, поскольку вершенствованная модель переноса пыли все еще не разработана из-за существования сложных денных физических процессов во время ветровой эрозии. Учитывая описанные сложности, результаты этого исследования очевидны: тема достаточно аккуратно рует перенос пыли с высохшего дна Аральского моря.

Моделируемые переносы ли достаточно хорошо согласуются при сравнении со спутниковыми изображениями песчаной бури 18 апреля 2003 г. (рис.2), опубликованных в интернет-сайте NASA [14]. Как видно, формы и направления переноса частиц пыли совпадают с моделированным полем странения частиц песка и пыли.

Как видно из моделируемой поверхностной температуры

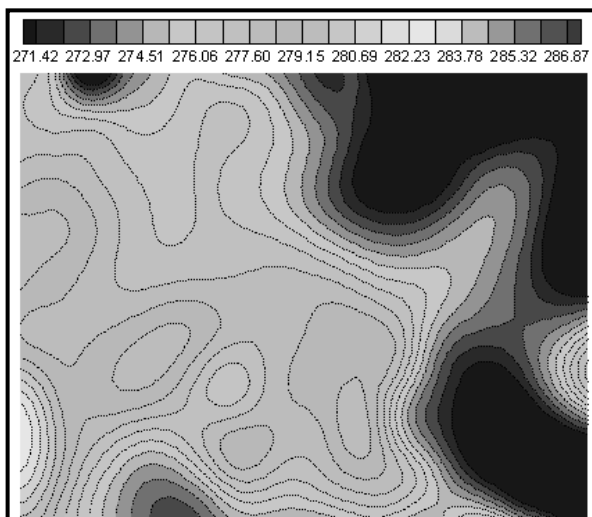


Рис.3. Моделируемая поверхностная температура и характерные особенности поля ветра в районе Аральского моря 18.04.2003 г.

апреля 2003 г. Местоположение фронтальной системы с острыми температурными градиентами можно легко установить с помощью рисунка.

За моделируемый период 2003 г. модель сумела обнаружить количество и основные направления песчаных бурь с высохшего дна Аральского моря. Установлено, что основными транспортными направлениями пыли, с частотой более 12, были Ю, Ю-ЮЗ, ЮЗ и З-ЮЗ. Перенос пыли на направления В, В-ЮВ, ЮВ, Ю-ЮВ был обнаружен 6 раз, а на С, С-СВ, СВ, В-СВ - 4 раза. Перенос пыли на направления З, З-СЗ, СЗ и С-СЗ установлен только 2-3 раза.

Институт зоологии и паразитологии им. Е.Н.Павловского *Поступило 18 августа 2008 г.*
АН Республики Таджикистан,

**Лаборатория по моделированию окружающей среды*
Токийского университета, Япония

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. UNEP/CBD/SBSTTA. – Habitat Destruction in the World's Waters: Progress report by the Global International Waters Assessment. Montreal, 2003, p.5.
2. IFAS. – International Fund for saving the Aral Sea, 2002 (<http://www.ec-ifas.org>).
3. Micklin, P., Williams W.D. – NATO ASI Series 2: Env., Berlin, 1996, v.12, pp.5-6.
4. Singer A., Zobeck T. et al. – J. of Arid Env., 2003, №54, pp.705-728.
5. Denisov Yu.M. – J. Prob. Des. Dev., 1998, №3, pp.21-25.
6. Esenov P. – J. Prob. Des. Dev., 1998, №34, pp.70-75.
7. Tolkacheva G.A., Kovalevskaya Yu.I. et al. – J. Prob. Des. Dev., 1998, №3, pp.55-59.
8. Kamalov S. – J. Prob. Des. Dev., 1998, №3, pp.25-35.
9. Razakov R.M., Kosnazarov K.A. – NATO ASI Series 2: Env., Berlin, 1996, v.12, pp.17-22.
10. Semenov O.E. – J. Prob. Des. Dev., 1998, №3, pp.37-44.
11. Montero G., Montenegro R., Escobar J.M. – J. of Win. Eng. & Ind. Aer., 1998, v.74, pp. 249-261.
12. Holton J. R. – An Introduction to Dynamic Meteorology. - New York, Acad. Press, 2004, p.74.
13. Gillette D., Ono D., Richmond K. – J. Geophys. Res., 2004, p.109.
14. http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=5252

Б.Р.Нахшиниев, Т.Саго

**ТАҲРСОЗИИ ПАҲНШАВИИ ЧАНГУ ҒУБОР АЗ САТҲИ ХУШКГАРДИДАИ
БАҲРИ АРАЛ**

Дар мақола натиҷаҳои таҳрсозии рақамии паҳншавии чангу ғубор аз сатҳи хушкгардидаи баҳри Арал, бо назардошти микдор ва самтҳои ҳаракати чанг муҳокима гардидааст.

B.R.Nakhshiniev, T.Sato

**NUMERICAL SIMULATION OF WINDBLOWN DUST EMISSION
FROM DRIED-UP BOTTOM OF ARAL SEA**

This article describes the results of the modeling of windblown dust emission from dried-up bottom of Aral Sea including its quantities and transport directions.