

УДК 551.515.3 (262.83)

И.В. Каипов *
 Канд. физ.-мат. наук О.Е. Семенов **
 А.П. Шапов **

ВЫНОС МАССЫ АЛЕВРИТОВОГО АЭРОЗОЛЯ С ОСУШЕННОЙ ЧАСТИ АРАЛА ВО ВРЕМЯ ПЫЛЬНОЙ БУРИ 28...29 АПРЕЛЯ 2008 ГОДА

АРАЛ, СУХОЕ ДНО, АЛЕВРИТЫ, РАЗМЕР, ЧАСТИЦА, ПЫЛЬНАЯ БУРЯ, КОСМОС, МОДЕЛЬ, МАССА, РАСХОД, ВЫНОС

По ранее опубликованной методике комплексных расчетов переноса массы частиц во время пыльных бурь с привлечением информации с ИСЗ и вычислением по мезомасштабной гидродинамической модели WRF полей давления, скорости ветра и динамической скорости выполнена оценка выноса массы алевритовых и солевых частиц с осушенной части дна Большого Арала для сильной бури 28...29 апреля 2008 г. Распределение алевритовых частиц по размерам априори задано логарифмически нормальной функцией со средним геометрическим размером: $x_0 = 50$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,23$ – для одного варианта вычислений и $x_0 = 35$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,27$ – для второго. Рассчитаны вертикальные профили твердого расхода массы частиц при различных скоростях ветра. Масса аэрозоля, вынесенная за бурю, достигает 2,6 и 5,4 млн. т для соответствующих размеров частиц.

В предыдущей статье авторов описана разработанная методика комплексной оценки выносов массы алевритовых частиц с осушенной части дна Большого Арала с привлечением информации из космоса. Отсутствие данных наблюдений метеостанций на сухих поверхностях дна восполнено в ней вычислением полей давления, скорости ветра и динамической скорости с помощью мезомасштабной гидродинамической модели WRF. Распределение алевритовых частиц по размерам априори задано логарифмически нормальной функцией со средним геометрическим разме-

* Институт космических исследований, г. Алматы

** КазНИИЭК, г. Алматы

ром: $x_0 = 50$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,23$ – для одного варианта вычислений и $x_0 = 35$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,27$ – для второго. Для сильной бури 7 мая 2007 г. рассчитаны вертикальные профили твердого расхода в приземном слое атмосферы до высоты 170 м, общий расход массы в этом слое и в пограничном слое атмосферы. Масса аэрозоля, вынесенная за бурю, достигает 8 и 16,4 млн. т для соответствующих размеров частиц [2].

Аналогичная работа выполнена в этой статье и для сильной песчано-пылевой бури в регионе Аральского моря, которая была зафиксирована с ИСЗ AQUA 29 апреля 2008 года в 9 часов 40 минут по среднему времени Гринвича (СГВ). Формированию этой бури предшествовала теплая сухая погода с температурами до +25 °С, которая способствовала высыханию поверхностного слоя донных отложений Большого Арала. Аэрозольный шлейф её выноса протянулся в сторону Каспийского моря более чем на 800 км (Рис. 1).

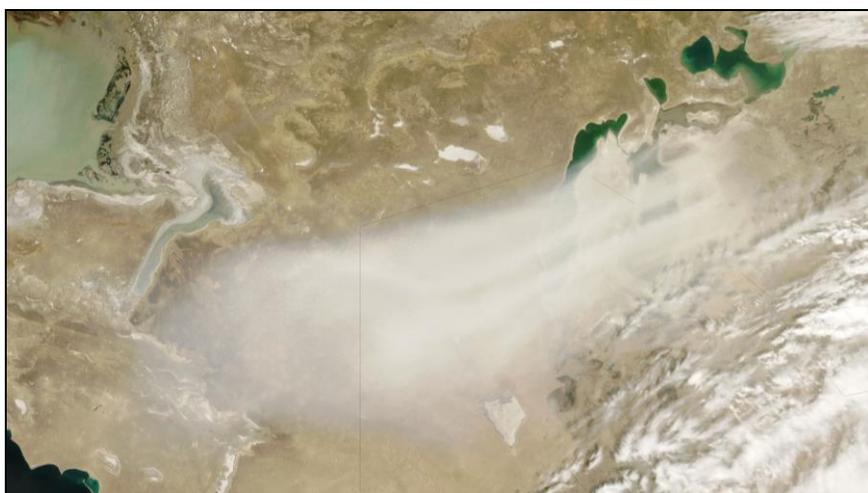


Рис. 1. Пыльная буря 29 апреля 2008 г. над регионом Аральского моря в 09:45 по Гринвичу. ИСЗ AQUA.

В этом регионе это был один из наиболее длинных шлейфов, зафиксированных из космоса. Площадь его достигала свыше 160 тыс. км². Источниками выноса аэрозоля стали: восточное побережье Арала, донные отложения восточной и северной части осушенного дна Большого Арала, бывший остров Возрождения и образовавшиеся вокруг него пляжи. Ширина шлейфа, сформировавшегося в источнике – 207 км. Геоморфология и данные о дисперсном составе песчаных донных отложений на современном этапе гибели Большого Арала дана в работах Бродской, Кравцовой и наших исследованиях, поэтому в этой статье не рассматриваются [1 - 6].

Синоптическая ситуация. Синоптическая ситуация, предшествующая возникновению пыльной бури в регионе Аральского моря, характеризовалась быстрой перестройкой полей давления. Особенно это хорошо видно на высотной карте 850 гПа, между 6 и 12 часами по СГВ 28 апреля 2008 года. Над исследуемой территорией у земли в предшествующие 2-е суток наблюдалась медленная трансформация зоны повышенного давления, которой на высоте 1500 метров соответствовал гребень высокого давления. В промежутке между 6 и 12 часами 28 апреля у земли отрог антициклона отделился от основной части зоны высокого давления с образованием изолированного очага над восточной частью Аральского моря. В это время на высоте 850 гПа над всей акваторией Арала и прилегающим обширным территориям высотный гребень сменился высотной ложбиной, которая слилась с зоной низкого давления. К концу суток 28 апреля эта зона заняла все пространство над Центральной Азией от Каспийского моря до Алтая. К 18 часам 29 апреля изолированный очаг высокого давления соединился с основным антициклоном и его отрог снова восстановился.

Результаты численного моделирования метеорологических полей

Для временного интервала, в котором произошла песчано-пылевая буря 29 апреля 2008 года над регионом Аральского моря, выполнены численные эксперименты по моделированию метеорологических полей давления, температуры и скоростей ветра. На рис. 2 представлен домен интегрирования с центром $\varphi = 42^\circ$ и $\lambda = 56^\circ$. Буря была зафиксирована с ИСЗ в 9 часов 43 минут по СГВ (14 час 43 мин по местному). Моделирование выполнено для интервала времени с 0 часов 28.04.2008 г. до 18 часов 30.04.2008 г. Полученные результаты позволили воссоздать условия развития дефляции дна Арала и формирования аэрозольного шлейфа выноса. Результаты моделирования излагаются ниже.

Поля метеорологических элементов, необходимые для моделирования процесса переноса пыли и песка, получены из архивов прогноза метеорологических данных и реанализа, и для дальнейшего использования конвертированы в приемлемые форматы. Единственно доступными данными для нас являются поля метеорологических параметров, полученные на основе Глобальной системы прогнозирования погоды Global Forecasting System (GFS) [9, 11]. Метеорологические поля были получены с интервалом 6 часов и шагом по сетке 0,5 градуса. Внутри вышеуказанных временных и пространственных шагов поля данных считаются постоянными. На рис. 3 приведены поля приземных скоростей ветра за

28, 29 и 30 апреля, соответствующие времени возникновения, развития и окончания пыльной бури.

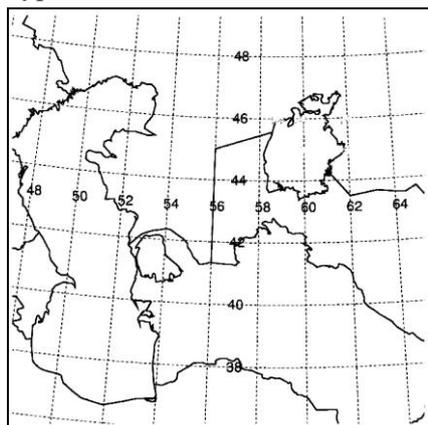


Рис. 2. Домен интегрирования.

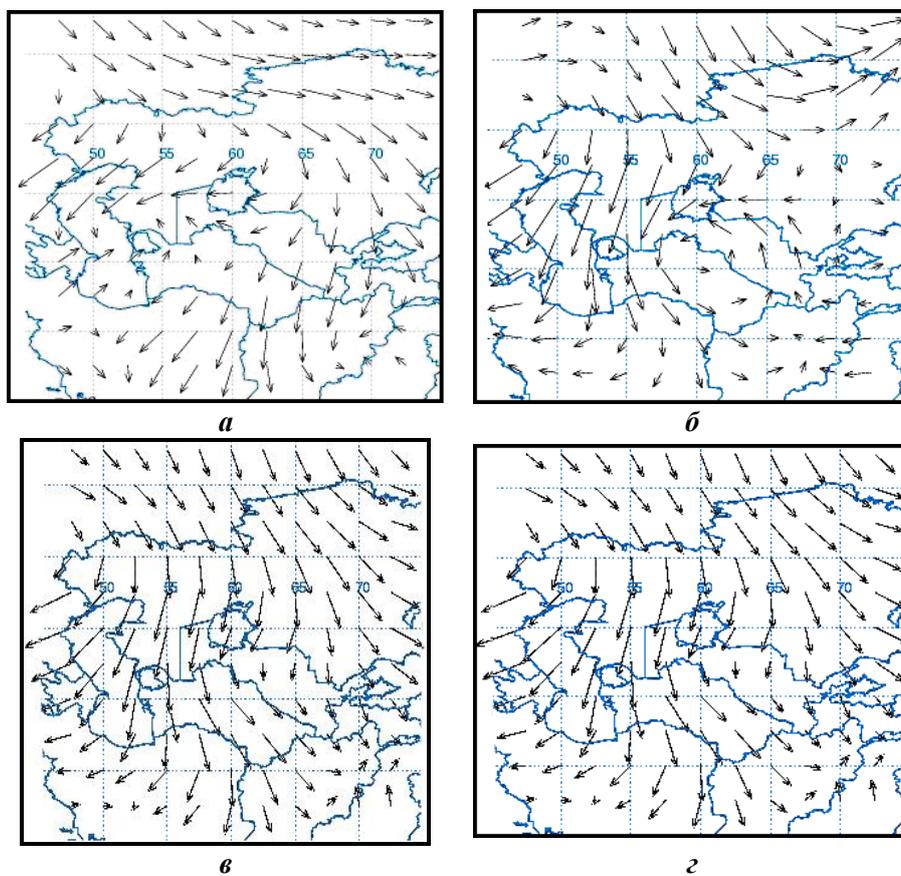


Рис. 3. Поля приземной скорости ветра в Арало-Каспийском регионе 28 и 29 апреля 2008 г. а – 28 апреля 12 час, б – 29 апреля 06 час, в – 29 апреля 12 час, г – 30 апреля 06 час.

28 апреля в 12 час ветер над Аралом был умеренной скорости восточного направления. В это время над северным Каспием и плато Устюрт сформировались сильные ветровые потоки СВ и ВСВ направлений (рис. 3а). 29 апреля в 06 час скорость потоков над всей акваторией Каспия, Устюртом и Туркменией усилилась, направление ветра над Аралом стало СВ и скорость также возросла (рис. 3б). К 12 час ветер северных румбов усилился над всей территорией Казахстана, над Аралом направление ветра изменилось на ССВ (рис. 3в).

30 апреля в 06 час над северной половиной Казахстана ветер ослаб и принял западное направление. Над Арало-Каспийским регионом сохранились ещё значительные скорости ветра, над северной половиной и центральными областями акватории Каспия сильные потоки воздуха приняли восточное направление. Над югом Каспия и Ираном слабые ветры имели западное направление. Над Южным Казахстаном, Аралом, Узбекистаном и Туркменией сохранялись значительные скорости потоков северо-восточного румба (рис. 3г).

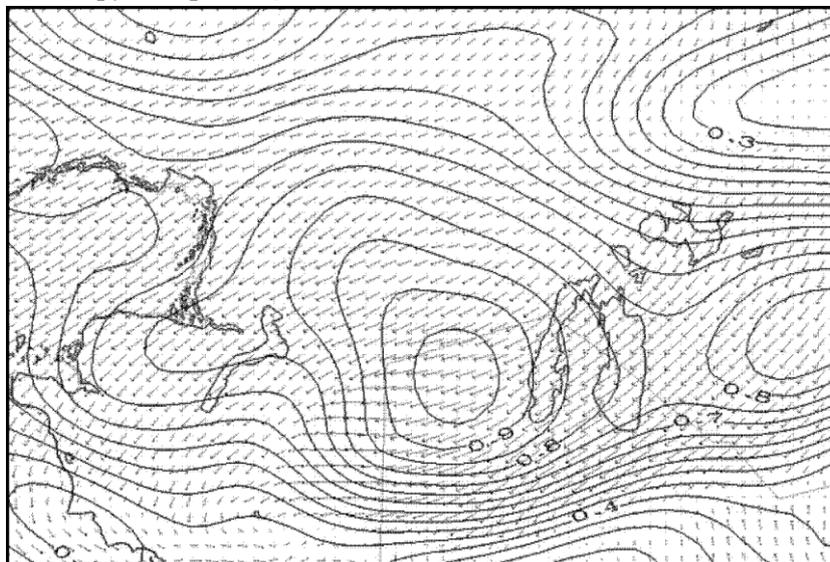


Рис. 4. Поле ветра и изолинии динамической скорости потока во втором домене за 00 час СГВ 29 апреля 2008 г.

На картах домена была выделена площадь Большого Арала, над которой детально описаны изменения во времени динамической скорости ветра. На рис. 4 показано поле динамической скорости u_* с изолиниями её одинаковых значений и указанием направлений потоков в 00 час по СГВ 29 апреля на момент максимальных скоростей ветра в рассматриваемом

нами интервале времени. Территория дна Арала оказалась в поле значительных динамических скоростей потока 0,85...0,75 м/с, что вызвало сильную бурю, шлейф от которой был зафиксирован спутником (рис. 1).

Рис. 5, на котором приведено изменение динамической скорости во времени в четырех различных районах Арала, позволяет определить продолжительность, интенсивность выдувания поверхности донных отложений и масштабы выноса массы аэрозоля за пределы источника. Слабая буря началась 28 апреля около 01 час СГВ (6 час утра местного времени). Динамическая скорость достигла на большой площади значений 0,20...0,25 м/с, местами – до 0,30 м/с и превысила критическое значение начала выдувания частиц грунта ($u_{*k} = 0,15$ м/с).

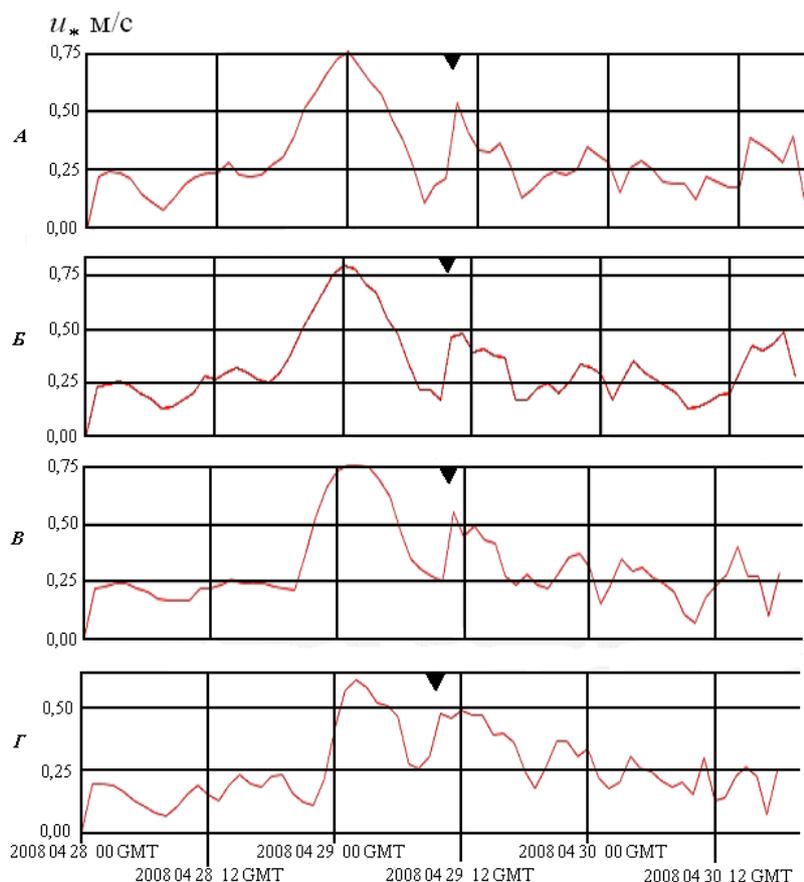


Рис. 5. Динамическая скорость потока над дном Большого Арала с 00 час СГВ 28 апреля до 18 час СГВ 30 апреля 2008 г. в период развития интенсивного ветрового выноса пыли и солей. Разрез по долготе $\lambda = 60,5^\circ$ с севера на юг: А – на широте $\varphi = 45,6^\circ$; Б – $\varphi = 45,3^\circ$; В – $\varphi = 44,9^\circ$ и Г – $\varphi = 44,3^\circ$. Символ \blacktriangledown указывает момент снимка бури на рис. 1.

На песчаных поверхностях процесс ветрового переноса частиц грунта шел поземкой, а на алевритовых – в виде пыльной бури слабой интенсивности. Мелкие частицы алеврита и пыли уже заполняли при большой длине разгона потока над поверхностью сухого дна весь приземный слой атмосферы. Высота их подъема достигала 100 и более метров, что далее будет показано при вычислениях профилей твердого расхода массы частиц в приземном слое атмосферы, который превышает при сильных ветрах 120...160 м [4, 5].

Это усиление ветра было не стабильным как по площади источника, так и во времени. Перенос носил прерывистый характер, временами скорость ветра снижалась ниже критического значения. Этот период развития слабого по интенсивности переноса частиц ветром длился на северных участках 15...16 часов, на юге – 20...22 часа. Затем началось устойчивое усиление скоростей ветра. По территории дна Большого Арала оно происходило не одновременно.

На севере в 16 часов ветер усилился и достиг на широте $45,6^\circ$ максимального значения в 24 часа. Динамическая скорость u_* была в это время равна 0,75 м/с. На широте $45,3^\circ$ увеличение скорости ветра началось на час позже в 17 часов, и максимум скорости потока был также в 24 часа – $u_* = 0,80$ м/с. На широте $44,9^\circ$ усиление ветра началось со сдвигом на 3 часа – в 20 часов. Максимальная скорость ветра была в 00 час 30 мин 29 апреля – $u_* = 0,75$ м/с. Ещё южнее ($\varphi = 44,3^\circ$) увеличение скорости потока началось на два часа позже – в 22 часа. Максимальное значение динамической скорости здесь было в 02 часа 29 апреля, и её значение было меньше – $u_* = 0,60$ м/с.

В северной части рассматриваемой территории на широте $\varphi = 45,6^\circ$ после достижения максимального значения u_* началось её равномерное снижение до значений, ниже критической. Около 06 час 30 мин ветровой перенос грунта прекратился примерно на час. А затем скорость ветра вновь начала увеличиваться и в 10 час u_* стала равна 0,55 м/с. В момент этого нового усиления ветра и был сделан снимок из космоса шлейфа бури, который сформировался в течение 14 часов во второй половине суток 28 апреля, ночного и раннего утреннего периода 29 апреля. Новая буря длительностью около 7 часов проходила при меньших скоростях ветра. Динамическая скорость после достижения значения $u_* = 0,55$ м/с снизилась в течение полутора часов до 0,30 м/с и в дальнейшем постепенно затухала с кратковременными усилениями и спадами.

Очевидно, что для нас представляет интерес только эти две бури, проходящие при значительных скоростях ветра. Слабые бури за этот же промежуток времени 28 и 29 апреля прошли с небольшими расходами массы твердой фазы потока, отличающимися от расходов двух сильных бурь на два и более порядка величин. Поэтому на трех остальных широтах определим продолжительность только двух сильных бурь и значения динамической скорости u_* .

Буря на широте $\varphi = 45,3^\circ$ началась на час позже, чем на $\varphi = 45,6^\circ$ в 17 час 28 апреля и продолжалась 15 часов – до 8 часов 29 апреля. Максимальное значение u_* при первом усилении ветра достигло 0,80 м/с. Далее в течение 2,5 часов она мало изменялась – от 0,80 м/с до 0,75 м/с. Вторая буря меньшей интенсивности началась одновременно с усилением ветра на $\varphi = 45,6^\circ$, и была такой же продолжительностью 7 часов при максимальном значении $u_* = 0,47$ м/с, которое сохранялось 1,4 часа. Затем скорость ветра снизилась до $u_* = 0,4$ м/с и 3 часа была в интервале значений 0,37...0,40 м/с. После чего буря стала стихать, u_* упала к 16 часам до значения критической ветрового переноса.

На широте $\varphi = 44,9^\circ$ увеличение скорости ветра началось в 20 часов 28 апреля. Эта буря длилась 14 часов. В 00 час 30 мин 29 апреля она достигла максимального значения – $u_* = 0,75$ м/с, которое удерживалось на этом уровне в течение 3-х часов. Затем скорость ветра начала снижаться. К 7 часам u_* упала до 0,35 м/с, к 10 час – до 0,25 м/с. В 10 часов началась вторая буря, которая продолжалась 6 часов. К 11 часам u_* выросла до 0,55 м/с, затем в 12 часов упала до 0,45 м/с, к 15 часам – до 0,40 м/с, к 16 часам – до 0,25 м/с.

На широте $\varphi = 44,3^\circ$ рост скорости ветра начался с большим запаздыванием по сравнению с северными районами – в 22 часа. Длилась эта буря около 10 часов. Максимальное значение динамической скорости было в 2 часа 29 апреля $u_* = 0,60$ м/с. В течение 2 часов u_* изменялась незначительно в интервале 0,58...0,60 м/с. Затем за 40 мин она снизилась до 0,5 м/с и вновь 2 часа удерживалась около этого значения. В 6 часов ветер стал стихать, и к 7 часам динамическая скорость снизилась до 0,26 м/с. Один час длился интервал относительного затишья, а потом началась вторая буря. Скорость выросла до $u_* = 0,48$ м/с и удерживалась на этом

уровне 4 часа. Затем за 40 минут u_* уменьшилась до 0,38...0,35 м/с. Через два часа ветер начал стихать и к 19 часам динамическая скорость упала до 0,18 м/с. Как видим, интенсивность выветривания донных отложений на юге была меньшей, чем в центральных и северных частях осушенного дна Большого Арала.

Определив продолжительность явлений дефляции различной интенсивности и динамическую скорость потока – основные параметры пыле-солевой бури, можно перейти к определению масштабов переноса и выноса массы аэрозолей за время этого опасного явления погоды.

Определение масштабов переносимых ветром масс частиц твердой фазы потока во время бури 28...29 апреля 2008 г.

Гранулометрический состав алевритовых отложений на дне Арала для этой бури был взят тот же, что и для бури 7 мая 2007 года – две функции логарифмически нормального распределения частиц алевритов по размерам с параметрами: $x_0 = 50$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,23$ и $x_0 = 35$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,27$ [2]. Для этих двух вариантов распределений частиц по размерам выполнены расчеты характеристик переноса ветром масс алевритовых отложений. Наиболее удобной величиной при определении масс частиц твердой фазы, перемещаемых воздушными потоками, является твердый расход q – масса твердой фазы, переносимая в единицу времени через единицу площади поперечного сечения потока, кг/(м²·с). На рис. 6 показаны вертикальные профили твердого расхода массы алевритовых частиц, переносимых ветром во время рассматриваемой нами пыльной бури в приземном слое атмосферы при различных скоростях потока и размерах частиц $x_0 = 35$ мкм и $x_0 = 50$ мкм. Расчет выполнен по формуле

$$q(z) = q_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,57 \frac{w_g}{u_*}}, \quad (1)$$

где q_1 – твердый расход на высоте z_1 , кг/(м² с); w_g – скорость свободного падения частиц (гидродинамическая крупность частиц), м/с, u_* – динамическая скорость потока (скорость трения), м/с. Формула (1) получена по измерениям во время песчаных бурь, поэтому в статье авторов [2] на основании теоретических результатов Баренблатта и Голицына [8] показано, что формула (1) может быть применена и для частиц по размеру значительно меньших размера частиц песка (< 50 мкм).

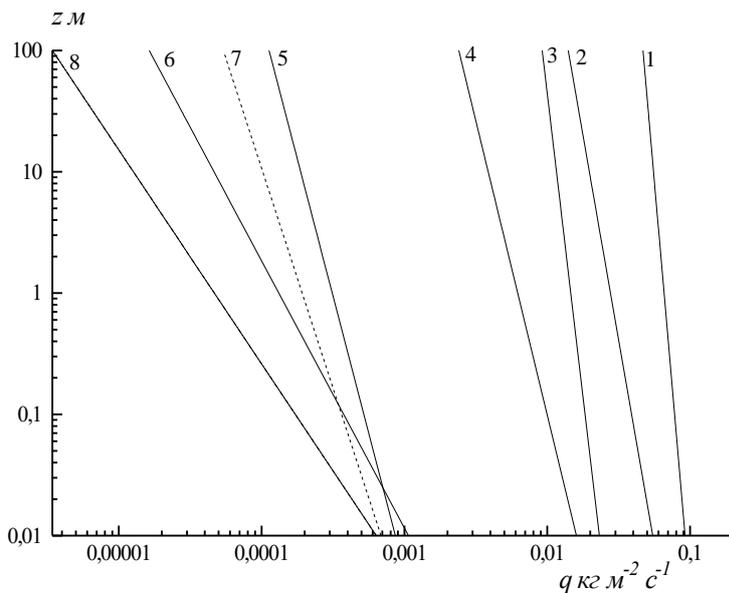


Рис. 6. Вертикальные профили твердого расхода алевритовых частиц во время бури в приземном слое атмосферы: 1 – $u_* = 0,75 \text{ м/с}$, $x_0 = 35 \text{ мкм}$; 2 – $u_* = 0,75 \text{ м/с}$, $x_0 = 50 \text{ мкм}$; 3 – $u_* = 0,55 \text{ м/с}$, $x_0 = 35 \text{ мкм}$; 4 – $u_* = 0,55 \text{ м/с}$, $x_0 = 50 \text{ мкм}$; 5 – $u_* = 0,25 \text{ м/с}$, $x_0 = 35 \text{ мкм}$; 6 – $u_* = 0,25 \text{ м/с}$, $x_0 = 50 \text{ мкм}$; 7 – $u_* = 0,20 \text{ м/с}$, $x_0 = 35 \text{ мкм}$; 8 – $u_* = 0,20 \text{ м/с}$, $x_0 = 50 \text{ мкм}$.

Для её использования необходимо знать ещё два параметра: w_g и q_1 . Ниже приведены значения скорости свободного падения w_g для частиц различного размера с плотностью $2,65 \text{ г·см}^{-3}$ [2, 6].

x_0 , мкм	120	100	50	40	35	30	20	10
w_g , см/с	96	76	19,9	12,7	9,7	7,1	3,2	0,8

Последней, необходимой величиной является твердый расход q_1 на одном из уровней z_1 . При отсутствии измеренных значений q_1 , можно для его определения воспользоваться полученной нами зависимостью твердого расхода песка на высоте 1 м от динамического аналога числа Фруда

$$q_1 = 1,09 \cdot 10^{-9} \cdot Fr_*^{2,42}, \quad (2)$$

где Fr_* – динамический аналог числа Фруда: $Fr_* = u_*^2 / (g \cdot x_0)$. Здесь g – ускорение силы тяжести. Используя (2), можно получить твердый расход на высоте одного метра q_1 в широком интервале скоростей ветра от 6 до 20 м/с [3, 6].

Таким образом, можно описать профиль твердого расхода песка $q(z)$ в пределах приземного слоя атмосферы или рассчитать его значение для нужных уровней, имея лишь стандартную метеорологическую информацию о скорости ветра и зная средний геометрический размер частиц на деятельной поверхности.

На рис. 6 хорошо видно, что расходы твердой фазы потока при больших значениях динамической скорости u_* , изменяющихся в интервале 0,20...0,25 м/с, на один-два порядка меньше расходов при u_* , превышающей 0,55 м/с. Поэтому при вычислении масштабов выносимой ветром массы частиц во время двух бурь 28...29 апреля будем далее рассматривать лишь ветровой перенос частиц во время двух усилений ветра свыше значений $u_* = 0,25$ м/с.

Представленные на рис. 6 вертикальные профили твердого расхода 1...8 аппроксимируются, соответственно, следующими функциями:

$$q(z) = 0,0657 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,074} \quad \text{для } u_* = 0,75 \text{ м/с и } x_0 = 35 \text{ мкм}, \quad (3)$$

$$q(z) = 0,0277 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,148} \quad \text{для } u_* = 0,75 \text{ м/с и } x_0 = 50 \text{ мкм}, \quad (4)$$

$$q(z) = 0,0146 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,10} \quad \text{для } u_* = 0,55 \text{ м/с и } x_0 = 35 \text{ мкм}, \quad (5)$$

$$q(z) = 0,0062 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,21} \quad \text{для } u_* = 0,55 \text{ м/с и } x_0 = 50 \text{ мкм}, \quad (6)$$

$$q(z) = 3,12 \cdot 10^{-4} \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,221} \quad \text{для } u_* = 0,25 \text{ м/с и } x_0 = 35 \text{ мкм}. \quad (7)$$

$$q(z) = 1,32 \cdot 10^{-4} \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,454} \quad \text{для } u_* = 0,25 \text{ м/с и } x_0 = 50 \text{ мкм} \quad (8)$$

$$q(z) = 1,922 \cdot 10^{-4} \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,276} \quad \text{для } u_* = 0,20 \text{ м/с и } x_0 = 35 \text{ мкм} \quad (9)$$

$$q(z) = 4,665 \cdot 10^{-5} \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-0,567} \quad \text{для } u_* = 0,20 \text{ м/с и } x_0 = 50 \text{ мкм} \quad (10)$$

Для получения общего расхода масс переносимых ветром частиц

$$Q_z = \int_{z_1}^{z_2} q(z) dz, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$$

было выполнено численное интегрирование этих функций в слоях 0,01...100 м, 0,01...1000 м и 0,01...1500 м, что позволило получить оценку переносимой массы частиц над алевритовыми поверхностями в приземном слое и в пограничном слое высотой 1000 и 1500 м. Результаты интегрирования уравнений (3) – (10) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Интегральное содержание массы частиц в различных слоях пограничного

слоя атмосферы $Q_z = \int_{z_1}^{z_2} q(z) dz, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$

Уравнение $q(z)$	Динамическая скорость u_* , м/с	Общий расход в слое, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$		
		0,01...100 м	0,01...1000 м	0,01...1500 м
Алевритовая поверхность $x_0 = 35$ мкм				
3	0,75	5,04	42,56	61,995
5	0,55	1,02	8,13	11,71
7	0,25	0,015	0,087	0,120
9	0,20	0,0074	0,0395	0,0531
Алевритовая поверхность $x_0 = 50$ мкм				
4	0,75	1,64	11,7	16,53
6	0,55	0,298	1,84	2,54
8	0,25	0,003	0,0109	0,0137
10	0,20	0,0008	0,0023	0,0028

Содержание табл. 1 подтверждает возможность пренебрежения в дальнейших наших расчетах переносом массы алевритовых частиц при небольших значениях динамической скорости. Массы частиц в расчетных слоях переноса на два порядка меньше, чем при $u_* = 0,5$ м/с.

В своих дальнейших расчетах мы воспользуемся зависимостью общего расхода песка в приземном слое атмосферы 50-ти процентной обеспеченности

$$\bar{Q}_z = Q_{z,50\%} = 2 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2, \quad (11)$$

которую мы использовали ранее при вычислениях выноса ветром массы алевритов за бурю 07.05.2007 г [2]. Определив общий расход массы частиц для наблюдавшихся значений u_* , можно рассчитать их массу, переноси-

мую ветром за бурю через фронт переноса шириной один метр

$$M = \int_0^{\tau} Q_z(t) dt.$$

Ввиду отсутствия математического описания функции общего расхода песка во время бури, будем определять перемещаемую массу песка за бурю M длительностью τ не интегрированием по времени непрерывной функции $Q_z(t)$, а рассчитывать за дискретные интервалы времени. Длительность продолжительной бури τ можно представить в виде суммы

$$\tau = \sum_{i=1}^n \Delta t_i,$$

в течение которых u_* может быть приближенно принята постоянной величиной. Тогда перенесенную за бурю массу песка можно рассчитать по формуле

$$M = \sum_{i=1}^n Q_{zi} \cdot \Delta t_i,$$

где Q_{zi} – общий расход песка в i -й интервал времени. Для вычислений мы воспользовались двумя кривыми изменения u_* во времени на рис. 5. Для первой бури 28...29 апреля на широте $\varphi = 44,9^\circ$ с.ш. взята (**B**), для второй бури днем 29 апреля – кривая изменения $u_* = f(t)$ на широте $\varphi = 44,3^\circ$ с.ш. (**Г**). Обе они были аппроксимированы в виде гистограмм. Выбор двух различных широт для расчетов переносимой массы частиц твердой фазы потока объясняется упрощением аппроксимации их более стабильных кривых $u_* = f(t)$ гистограммами. Результаты расчетов вынесенной суммарной массы частиц из источника за обе бури в приземном слое атмосферы высотой до 100 м приведены ниже.

Размер частиц x_0 , мкм	Вынесенная масса частиц, из источника через фронт переноса один км за две бури, тыс. т·км ⁻¹	Вынесенная масса частиц из источника через фронт переноса 207 км, млн. т
35	12,826+1,7 = 14,53	3
50	6,293+0,812=7,1	1,47

За рассмотренную бурю 28...29 апреля 2008 года длительностью около 20 часов за пределы осушенной части дна Большого Арала было вынесено примерно в 5,5 раза меньше алевритового и солевого аэрозоля,

чем за бурю в мае 2007 года продолжительностью 46 часов и при значительно больших скоростях ветра (u_* до 1 м/с). Однако вынос массы и за эту одну бурю превышает средние многолетние годовые выносы песчано-солевого аэрозоля 80-х годов прошлого столетия, когда выдуванию подвергались песчаные и супесчаные донные отложения, расположенные выше изобаты 15 метров [3, 6].

Большой научный и практический интерес представляет оценка масс частиц, переносимых во время бурь в различных слоях приземного и пограничного слоев атмосферы на выходе потока из источника выноса. Как известно, изменение с высотой турбулентного обмена выше приземного слоя атмосферы в пределах планетарного пограничного слоя атмосферы происходит по другому закону. Поэтому мы не можем с полной уверенностью экстраполировать полученные профили $q(z)$ выше 150...170 м. Но другого выхода у нас нет – ни профили массовой концентрации частиц твердой фазы, ни профили твердого расхода массы $q(z)$ во время бурь выше приземного слоя не исследованы.

Определим приближенное значение относительного содержания масс частиц в различных слоях потока во время пыльной бури при динамической скорости 0,75 м/с на различных высотах приземного и пограничного слоев атмосферы от общего расхода в слое 0,01... 1000 м

$$\frac{Q_{z_1} - Q_{z_2}}{Q_{z=1000}}$$

для алевритовых поверхностей.

Ранее такая оценка была выполнена для сильной песчаной бури при аналогичной динамической скорости ($u_* = 0,75$ м/с) над поверхностью, сложенной частицами песка с $x_0 = 120$ мкм [6, 7]. Это позволит количественно определить различие в переносе масс твердой фазы потока при песчаных и пыльных бурях. Для этой цели было выполнено интегрирование профилей твердого расхода (3) и (4) для различных слоев пограничного слоя атмосферы. Ниже приводятся полученные нормированные величины общего расхода массы частиц в 1000 метровом слое переноса частиц ветром алевритового и песчаного потока (Табл. 2).

Анализ результатов данных табл. 2 показывает, как сильно отличается ветровой перенос тяжелой быстро выпадающей из потока воздуха частицы песка от поведения более мелкой алевритовой частицы, на взвешивание которой затрачивается значительно меньше турбулентной энер-

гии. Хорошо видно, что наибольшая масса песка переносится в нижней части приземного слоя атмосферы – до 81 % её содержится в слое 0...10 м. Во всей толще приземного слоя, мощность которого во время бури около 100...150 м, перемещается до 92 % массы песка. На долю пограничного слоя атмосферы выше 100 м приходится 8 % массы песка. Эти числа опровергают сложившееся среди большинства исследователей песчаных бурь мнение, что достаточно исследовать при ветровом переносе песка только нижний метровый слой ветропесчаного потока. Такие измерения можно делать только над крупным песком со средним геометрическим размером частиц свыше 170...180 мкм. Ясно так же, что в дальнем переносе участвует не более 5...6 % от всей перемещаемой ветром массы песка. При более слабых песчаных бурях, по сравнению с рассматриваемой, доля частиц песка, участвующих в дальнем переносе, будет ещё меньше [6, 7].

Таблица 2

Относительное содержание массы частиц твердой фазы потока $\frac{Q_{z_1} - Q_{z_2}}{Q_{z=1000}}$ в различных слоях пограничного слоя атмосферы высотой $z = 1000$ м во время сильных пыльных и песчаных бурь

Толщина слоя $z_1 - z_2$, м							
0...10	10...50	50...100	100...200	200...400	400...600	600...800	800...1000
Песчаная поверхность $x_0 = 120$ мкм							
0,808	0,082	0,0298	0,027	0,0246	0,0133	0,009	0,007
Алевритовая поверхность $x_0 = 50$ мкм							
0,018	0,058	0,063	0,113	0,204	0,189	0,18	0,173
Алевритовая поверхность $x_0 = 35$ мкм							
0,014	0,048	0,056	0,107	0,203	0,195	0,19	0,187

Совершенно иная картина в потоке массы частиц пыльных бурь над донными алевритовыми поверхностями. В нижнем 10-ти метровом слое потока воздуха переносится всего лишь 1,5...2 % от всей массы алевритовых частиц в пограничном слое, в приземном слое толщиной 100 м – 12...14 %. На долю пограничного слоя выше 100 м приходится перенос основной массы частиц – 86...88 %, причем, на высотах свыше 400 м ветровыми потоками перемещается до 54...57 % их массы.

Формула (11) $\bar{Q}_z = Q_{z50\%} = 2 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2$, на основе которой нами выполнены оценки выноса масс алевритовых частиц, получена

по результатам измерений переноса песка во время бурь. Общий расход Q_z определялся путем интегрирования измеренных профилей твердого расхода песка $q(z)$ в приземном слое атмосферы, высота которого изменялась с увеличением скорости ветра от 20...30 м до 120...150 м. Поэтому приведенные в статье [2] вынесенные массы алевритов со дна Арала за пыльную бурю 7 мая 2007 г. и данные за бури 28...29 апреля 2008 г. в табл. 2, по-видимому, занижены, примерно, на 80 %. Ниже даны уточненные оценки масштабов выноса масс аэрозоля с учетом его переноса выше приземного слоя атмосферы до высоты 1000 м.

Размер частиц x_0 , мкм	Вынесенная масса частиц из источника бурей 7 мая 2007 г., млн. т	Вынесенная масса частиц из источника бурями 28 и 29 апреля 2008 г., млн. т
35	29,4	5,4
50	14,4	2,6

Моделирование выноса частиц размером 10 мкм (PM_{10}) на программном комплексе HYSPLIT 48

Большое значение при исследованиях потоков пыли при бурях имеет информация о длительном пребывании в атмосфере мелкодисперсного аэрозоля размером менее 10 мкм (PM_{10}). Время жизни этих частиц в атмосфере достигает нескольких десятков часов. Аэрозоли этого размера влияют на радиационные потоки в атмосфере, ведут к нагреванию верхних слоев пограничного слоя атмосферы, ограничивают приток солнечной энергии к поверхности земли, уменьшают конвективные движения воздуха. Их активное влияние на климат привлекает многих исследователей изучению этой проблемы. Крупная исследовательская программа в Сахаре выполняется сейчас, например, под руководством Шутца (Schütz L.) [12, 13].

Созданы математические модели, описывающие поведение частиц PM_{10} в атмосфере. Одной из таких программ является HYSPLIT 48 [10, 14]. Программа HYSPLIT 48 представляет собой систему как для относительно простых задач расчета траектории выноса, так и для моделирования сложных процессов переноса, дисперсии и выпадения аэрозолей различного генезиса. Алгоритмы расчета представляют собой гибрид Эйлера-Лагранжевого приближения. Адвекция и диффузия рассчитывается в Лагранжевой системе координат, а концентрация – в фиксированных узлах сетки. Перенос и рассеивание примесей рассматриваются или как простой выброс облака, или как рассеивание кластера частиц. Модель использует предварительно интерполированные в узлы сетки метеорологические дан-

ные, полученные на основе Глобальной системы прогнозирования погоды (GFS) [9, 11]. 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 расчета траектории, концентрации и выпадения частиц.

На основе модели HYSPLIT 48 были проведены численные эксперименты по моделированию переноса очень мелких частиц твердой фазы со средним размером 10 мкм во время песчано-пылевой бури над регионом Аральского моря 29 апреля 2008 года, которая зафиксирована ИСЗ в 9 час 43 мин по СГВ (рис. 1). Домен интегрирования с центром 42° с.ш. и 56° в.д. представлен на рис. 2. Моделирование проводилось с 6 час 28.04.2008 до 6 час 30.04.2008 года с общим временем интегрирования 48 часов. При моделировании по модели HYSPLIT 48 критическая скорость выдувания частиц PM_{10} была принята равной $u_{*k} = 0,28$ м/с [13]. Концентрация аэрозоля вычислялась ежечасно, в течение всего периода интегрирования. В этой статье мы не рассматриваем количественные характеристики моделирования переноса массы примеси. Нас интересовал процесс формирования шлейфа выноса пыли и его динамика изменения во времени и пространстве. Поэтому использовалась лишь часть результатов моделирования пыльной бури, которая представлена на рис. 7. На нем хорошо прослеживается процесс возникновения, развития, и затухания пыльной бури. Концентрические окружности с шагом 100 км дают представление о масштабе пыльной бури.

Пыльная буря, по модельным расчетам началась в 6 часов утра СГВ 28 апреля 2008 года. Вначале появились 5 поверхностных источников примеси, это те песчано-солевые поверхности, где скорость воздушного потока превысила пороговую критическую скорость срыва частиц с поверхности. Три источника располагались на 46° с.ш., на долготе 58°40', 60° и 62° в.д. Последний из них находился вне пределов территории Большого Арала. Два других – на широте 45°, долготе 60° и 61°50'.

Через два часа выносы от источников достигли в длину около 40 км, оставаясь изолированными друг от друга пятнами. К 14 час шлейфы источников на долготе 58°40' и 60° на 46° с.ш. соединились и достигли в длину 275 км, шлейф источника на 62° в.д. этой же широты был значительно меньше – 85 км. Два других источника на широте 45° оставались

все ещё самостоятельными, хотя их шлейфы достигли 200 км у западного и 150 км у восточного.

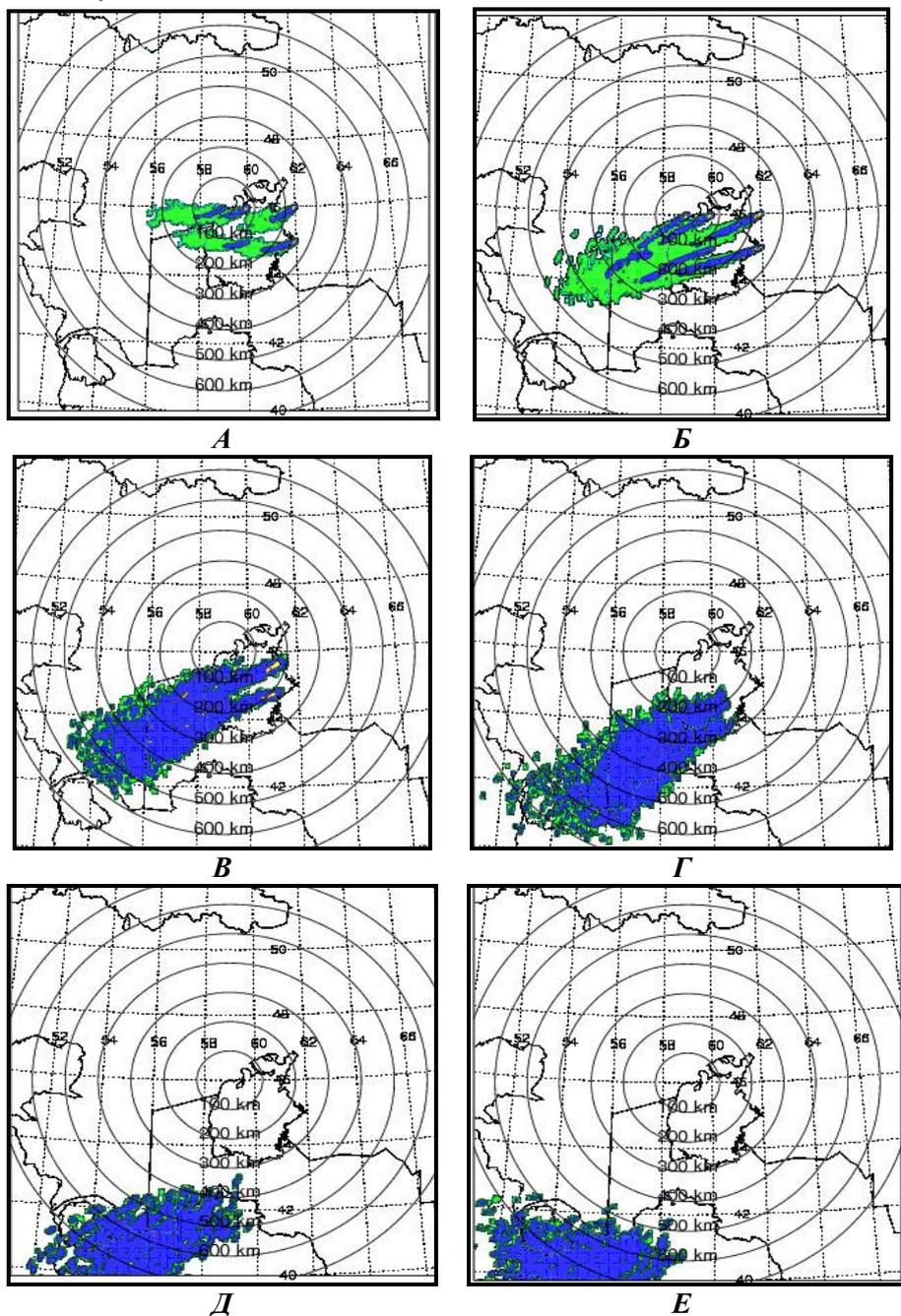


Рис. 7. Осредненная по высоте концентрация частиц PM_{10} при различных стадиях развития пыльной бури: А – 17 час 28.04; Б – 03 час 29.04; В – 09 час 29.04; Г – 15 час 29.04; Д – 00 час 30.04; Е – 05.час 30.04.2012

Перенос аэрозоля проходил в западном направлении в четырех источниках, в пятом с координатами 46° с.ш. и 62° в.д. – на юго-запад. Эти направления движения образовавшихся облаков мелкодисперсного аэрозоля PM_{10} соответствуют полю ветра на исследуемой территории (рис. 3а).

Дальнейшая динамика формирования и перемещения облака пыли хорошо видна на рис. 7. На нем более темным цветом показаны части шлейфов выноса частиц со средней концентрацией в слое $0...100$ м $C = 100$ мг/м³, более светлым – $C = 10$ мг/м³.

К 17 час 28 апреля шлейфы ещё не образовали единого облака частиц, но уже произошло их слияние от четырех источников с образованием выноса пыли в западном направлении протяженностью около 500 км. Направление перемещения выносов во всех пяти источниках изменилось. Оно стало ЗЮЗ, что хорошо видно по более темным их частям (рис. 7А). Все это время перенос частиц твердой фазы потока проходил при умеренных скоростях ветра и при несильной пыльной буре – u_* была в интервале $0,25...0,30$ м/с.

Следующий фрагмент моделирования относится (рис. 7Б) уже к моменту максимального усиления бури при динамической скорости u_* , достигавшей $0,75...0,8$ м/с ($15...18$ м/с на высоте 10 м). В 03 часа 29 апреля уже образовалось единое облако частиц PM_{10} , сохранившее направление движения на ЗЮЗ. На южной части сухого дна Арала добавились новые источники выветривания поверхности. Облако частиц приобрело в длину около 730 км при средней ширине 140 км. Головная часть облака, смещаясь к югу, достигла 54° в.д.

Результат моделирования на рис. 7В особенно интересен для нас, так как он получен для 09 час 29 апреля. Снимок из космоса (рис. 1) с эпизодом рассматриваемой нами бури 29 апреля сделан в **09 час 43 мин по СГВ**, что позволяет сравнить его изображение с результатами численного моделирования. Можно оценить качественное совпадение результатов численного моделирования с изображением из космоса шлейфа пыли как хорошее. Совпадают горизонтальные масштабы пылевого облака, направление выноса и фаза развития пыльной бури. Длина шлейфа выноса частиц PM_{10} достигла 820 км, ширина – до 270 км.

Моделирование позволило проследить и дальнейшее перемещение шлейфа выноса. В 15 час вынос ветром аэрозоля с северной части Большого Арала прекратился, на юге скорость ветра также понизилась до $u_* \approx$

0,35 м/с, и там ещё продолжалось слабое выветривание поверхности. Напомним, что при моделировании по HYSPLIT 48 критическая скорость выдувания частиц PM_{10} была принята равной $u_{*k} = 0,28$ м/с. Начиналась фаза его существования в отрыве от источников возникновения. По сравнению с предыдущим моментом моделирования, облако частиц начало смещаться на юг и увеличиваться в размерах. Смещение на юг произошло на градус широты. При той же длине 820 км оно расширилось до 360 км в своей головной части. Облако достигло акватории Каспия и пересекло границу Казахстана с Туркменистаном.

В полночь 30 апреля (рис. 7Д) облако частиц покинуло территорию Казахстана. Концевая часть шлейфа выноса аэрозоля сместилась на юг от Арала примерно на 100...150 км, головная часть облака располагалась над южной частью Каспия и, по-видимому, достигла границ Ирана. К сожалению, моделирование было ограничено 40° с.ш. и далее можно предполагать его поведение по изменению формы облака и полей скоростей ветра на рис. 3Г. Моделирование по HYSPLIT 48 в Лагранжевой модели переноса и выпадения частиц показало, что основная масса аэрозоля расположена в 2000 метровом слое. Поэтому дальнейшее продвижение облака над Ираном на юг должен был остановить хребет Центральный Эльбурс, средние высоты его достигают 2,5...3 км, а отдельные вершины достигают 3500 м и более. Снижение скоростей ветра и изменение направления движения с СВ в Арало-Каспийском регионе на З в предгорьях Эльбурса и над территорией Ирана привело к остановке перемещения головной части облака частиц. Но остальная часть шлейфа бури продолжала смещаться над территорией Туркменистана на ЮЮЗ, пока не достигла хребта Копетдаг. Фрагмент моделирования за 05 час 30 апреля подтверждает такой сценарий поведения облака частиц PM_{10} , которое протянулось на 500 км в широтном направлении над западной частью Туркменистана на удалении около 300 км от Арала. Здесь оно, видимо, и закончило свое существование.

Заключение

Привлечение современных моделей построения полей метеорологических данных для изучения выноса алевритовых и более мелких частиц донных отложений (PM_{10}), вычисления профилей твердого и общего расхода массы частиц в приземном слое атмосферы, позволило авторам исследовать возникновение, развитие и окончание сильной пыльной бури на Арале. Удалось количественно показать, как сильно отличается перенос

ветром мелких минеральных частиц во время пыльных бурь от переноса песчаных частиц. Выполнена оценка вынесенной за пределы осушенной части дна Арала массы алевритовых частиц за бурю 28...29 апреля 2008 г. – 2,6 млн. т для среднего геометрического размера частиц (50 мкм) или 5,4 млн. т для среднего геометрического размера частиц (35 мкм). Дальность выноса частиц PM_{10} оказалась равной 1400 км, частицы были вынесены на территории Северного Ирана и Западного Туркменистана. Получены уникальные характеристики этой бури. Но авторы хорошо понимают, что слабая изученность донных отложений Арала и физики пограничного слоя атмосферы во время пыльных бурь делает наши результаты лишь масштабной оценкой происходящих грандиозных процессов дефляции осушенного дна и загрязнения окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродская Н.Г. Осадкообразование в озерах засушливой зоны СССР. Аральское озеро-море // Образование осадков в современных водоемах – М.: Изд-во АН СССР. – 1954. – С. 237-282
2. Каипов И.В., Семенов О.Е., Чередниченко А.В., Шапов А.П. Оценка выноса массы алевритовых частиц с осушенного дна Большого Арала с использованием данных дистанционного спутникового зондирования и мезомасштабной гидродинамической модели // Гидрометеорология и экология. – 2012. – № 1. – С. 7-40.
3. Каипов И.В., Семенов О.Е., Шапов А.П. Песчано-солевые бури в Приаралье // Гидрометеорологические проблемы Приаралья. / Под ред. Г.Н. Чичасова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 276 с.
4. Кравцова В.И. Деграция Арала и прилегающих территорий: особые явления, наблюдаемые по космическим снимкам / Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе. // Тр. Международной науч. конференции, Москва 19 – 20 октября 2006. – С. 55 – 60.
5. Семенов О.Е., Шапов А.П. Геоморфологические условия развития дефляционных процессов и дисперсный состав песков Восточного Приаралья // Гидрометеорология и экология. – 1995. – № 4 – С. 76 – 98.
6. Семенов О.Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. – Алматы: ИП «Волкова Н.А.» – 2011.– 580 с.
7. Семенов О.Е. Моделирование переноса тяжелой быстро оседающей примеси воздушным потоком при бурях // Гидрометеорология и экология. – 2006. – № 3 – С. 5 – 35.

8. Barenblatt G.I., Golitsyn G.S. Local structure of Matyre Dust Storms // J. of the Atmospheric Sciences. – 1974. – Vol. 31. – № 7. – P. 1917-1933.
9. Chakrit Chotamonsak, Eric P. Salathé Jr, Jiemjai Kreasuwan, Somporn Chantara, Kingkeo Siritwitayakorn. Projected climate change over Southeast Asia simulated using a WRF regional climate model. // Atmospheric Science Letters. – 2011. – vol. 12. – Issue 2, April/June. – P. 213-219.
10. Draxler, R.R. Forecasting dust storms using HYSPLIT. / The Sino – US Workshop on Dust Storms and Their Effects on Human Health – November 25 – 26, Raleigh, North Carolina, 2002.
11. Hai Bian, Xuexi Tie., Junji Cao, Zhuming Ying, Suqin Han, Yong Xue. Analysis of a Severe Dust Storm Event over China: Application of the WRF-Dust Model // Aerosol and Air Quality Research. – 2011. – Vol. 11. – P. 419-428.
12. Kandler K., Schütz L., Deutscher C., Ebert M., Hofmann H., Jäckel S., Jaenicke R., Knippertz P., Lieke K., Massling A., Petzold A., Schladitz A.. Size distribution, mass concentration, chemical and mineralogical composition and derived optical parameters of the boundary layer aerosol at Tinfou, Morocco, during SAMUM 2006 / J. Tellus, Series B – Chem. and Phys. Meteorol. – 2009 – Vol. 61. – № 1. – P. 32-50.
13. Marticorena, B., Bergametti, G., Gillette, D., Belnap, J. Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States.// J. Geophys. Res., 1997. – V. 102: – P. 23277-23287.
14. Wain A.G., Lee S., Mills G. A., Hess G. D., Cope M. E. and Tindale N. Meteorological overview and verification of HYSPLIT and AAQFS dust forecasts for the dust storm of 22 – 24 October 2002 / Bureau of Meteorology Research Centre, Australia – January 2006.

Поступила 05.11.2012

И.В. Каипов
 Физ.-мат. ҒЫЛЫМД. канд. О.Е. Семенов
 А.П. Шапов

**АРАЛДЫҢ КЕПКЕН БӨЛІГІНЕН 2008 ЖЫЛДЫҢ
 28...29 СӘУІРІНДЕ БОЛҒАН ШАҢДЫ ДАУЫЛДАҒЫ АЛЕВРИТТИ
 АЭРОЗОЛДЫҢ ШЫҒУ САЛМАҒЫ**

Алдында жарияланған, ИСЗ мәліметтерін қарастыра отырып қысым алаңын, жел жылдамдығы және динамикалық жылдамдығын есептеу WRF мезомасштабты гидродинамикалық моделі арқылы шаңды дауыл кезінде тасымалданатын бөлшектер

салмағын есептеу әдістемесі бойынша 2008 жылдың 28...29 сәуінде болған күшті дауылда Үлкен Аралдың кепкен бөлігінің түбінен шыққан алевритті және тұзды бөлшектер салмағы бағаланған. Априори мөлшерімен алевритті бөлшектер үлестірілімі логарифмді функцияның орташа геометриялық өлшемімен берілген: есептеудің бірінші нұсқасы бойынша – $x_0 = 50$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,23$ және екіншісі үшін $x_0 = 35$ мкм, $\sigma_{lgx} = 0,27$ мкм. Әртүрлі жел жылдамдығы кезіндегі бөлшектер салмағының қатты ағымының тік кескіндері есептелген. Дауыл сыртына шығарылған сәйкес мөлшердегі бөлшектер үшін аэрозоль салмағы 2,6 және 5,4 млн. т жетті.