

УДК 551.515.3 (262.83)

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

**ОЦЕНКА ВЫНОСА МАССЫ АЛЕВРИТОВЫХ ЧАСТИЦ С  
ОСУШЕННОГО ДНА БОЛЬШОГО АРАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО СПУТНИКОВОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ И МЕЗОМАСШТАБНОЙ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

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

*Разработана методика комплексной оценки выносов массы алевритовых частиц с осушенной части дна Большого Арала с привлечением информации из космоса. Отсутствие наблюдений метеостанций на сухих поверхностях дна восполнено вычислением полей давления, скорости ветра и динамической скорости по мезомасштабной гидродинамической модели WRF. Распределение алевритовых частиц по размерам априори задано логарифмически нормальной функцией со средним геометрическим размером:  $x_0 = 50$  мкм,  $\sigma_{\lg x} = 0,23$  – для одного варианта вычислений и  $x_0 = 35$  мкм,  $\sigma_{\lg x} = 0,27$  – для второго. Для сильной бури 7 мая 2007 г. рассчитаны вертикальные профили твердого расхода в приземном слое атмосферы до высоты 170 м, обций 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.*

### **Введение**

Пыльные (песчаные) бури – широко распространенное явление погоды в Казахстане, так как около четверти территории республики занима-

---

\* Казгидромет, г. Алматы

\*\* КазНИИЭК, г. Алматы

ют пустыни. Самым мощным источником поступления аэрозолей в атмосферу являются, вот уже на протяжении около сорока лет, осушенные части дна Аральского моря. Обнажившаяся часть дна моря сложена засоленными почвогрунтами. Режим ветра с повышенными скоростями в сочетании с почвами легкого механического состава и песками способствовал развитию на осушенном дне моря дефляционных процессов и выносу песчаного и солевого аэрозоля на окружающие территории. Поэтому вполне естественно, что объектом исследований стала стремительно высыхающая часть дна Аральского моря и природные процессы, происходящие на ней.

В 70-х...90-х годах прошлого века выдуванию подвергались части дна, сложенные песчаными и супесчаными грунтами. Песчано-солевые бури в эти годы интенсивно исследовались силами научных коллективов Госкомгидромета СССР, Союзной и Республиканских Академий наук, других Министерств и Ведомств как экспедиционными наземными работами, так и самолетным зондированием. Казахский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (КазНИГМИ), ныне КазНИИЭЖ, был привлечен к изучению песчано-солевых бурь Арала в 1980 г.

С 1980 г. по 1998 г сотрудниками КазНИГМИ проведено 14 экспедиций на осушенную часть дна Аральского моря. Во время экспедиций получена информация по дисперсному составу песчаных массивов дна моря и окружающих его пустынь, солевому составу и содержанию солей в грунтах и грунтовых водах, об аэрозоле в приземном слое атмосферы во время бурь. Выполнены измерения профилей скоростей ветра и расхода масс песка во время бурь в приземном слое до высоты 16 м, получено их аналитическое описание и определены параметры этих функций. Для характеристики ветропесчаных потоков и их взаимодействия с подстилающей поверхностью получены основные термодинамические и кинематические параметры атмосферы при бурях. До настоящего времени результаты этих работ остаются уникальными, так как измерения ветропесчаного потока в приземном слое атмосферы до высоты 16 м никем не повторены [6, 13].

Важным шагом в изучении аэрозольных выносов со дна Арала явилось численное моделирование переноса тяжелых частиц в пограничном слое атмосферы, выполненное в 90-х годах Каиповым. Он изучил трансформацию ветропесчаного потока над источником выноса, и по мере удаления от него над водной и закрепленной песчаной поверхностями [1, 6].

Изучение физических особенностей переноса песка и его влияния на кинематику и динамику воздушного потока позволило создать физико-

статистическую модель песчано-солевых бурь и исследовать их климатический режим в Приаралье по данным наблюдений метеорологических станций. Впервые удалось оценить, в каком направлении, и какие массы песка и солей переносятся ветром в приземном слое атмосферы во время бурь. Были получены новые объективные климатические характеристики песчаных бурь, необходимые при проектировании строительных работ в пустынях, работе промышленных предприятий и при борьбе с песчаными заносами. Работы КазНИГМИ по мониторингу песчано-солевых бурь Арала опубликованы в трудах института и в монографиях [6, 13, 14].

Моделирование переноса песка при бурях на многолетних данных метеорологических станций показало, что дефляционные процессы в регионе очень динамичны во времени и на их мезо-масштабные характеристики оказывают влияние крупномасштабные процессы, происходящие в атмосфере всей планеты. В объемах ветрового переноса масс песка наблюдаются циклические изменения. Наибольшая интенсивность ветровых процессов на территории республики наблюдалась в 70-х годах, после чего наступила фаза их спада. К сожалению, с распадом СССР исследования бурь на Арале вначале были значительно сокращены, а затем и вовсе прекращены.

Быстрое падение уровня воды в Аральском море в начале 21 века привело к образованию новых больших площадей суши на территории Большого Арала, занятых отложениями алевритовых и глинистых илов с высоким содержанием солей, подвергающихся интенсивным процессам выветривания. Гранулометрический (дисперсный) состав алевритов дна Арала не исследован, и поведение такого мелкого аэрозоля в районе Арала совершенно не изучено. Неизвестен его элементный и ионный состав, содержание в атмосферных потоках, влияние на рассеяние и изменение спектрального состава солнечного излучения. Известно только, что алевриты состоят преимущественно из минеральных зерен (кварц, полевой шпат, слюда и др.) размером 0,005...0,1 мм (5...100 мкм), но детальная информация о функции распределения их частиц по размерам отсутствует. Алевритовые грунты должны так же легко подвергаться выдуванию, как и песчаные, так как они содержат в своем составе те же наиболее легко перемещаемые ветром частицы размером 70...100 мкм. Наличие в них более мелких частиц размером 5...50 мкм приводит к формированию более длинных шлейфов выносов аэрозолей из-за большей продолжительности жизни этих частиц в атмосфере.

Анализ космических снимков 2002...2008 годов подтверждает увеличившуюся повторяемость пылевых выносов из района Арала и большую оптическую плотность их изображения. Имеются космические снимки, на которых шлейфы пылевых выносов достигают более 700 км, что свидетельствует о большем обогащении потоков аэрозоля мелкими частицами и возросшей переносимой массе частиц твердой фазы. Такое увеличение расстояний выносов аэрозолей говорит о том, что границы зоны бедствия в Приаралье увеличились примерно вдвое.

Чтобы дать климатический количественный прогноз выноса и выпадения Аральского аэрозоля на окружающую территорию по мере дальнейшего падения уровня воды в Большом море необходимо иметь следующую информацию.

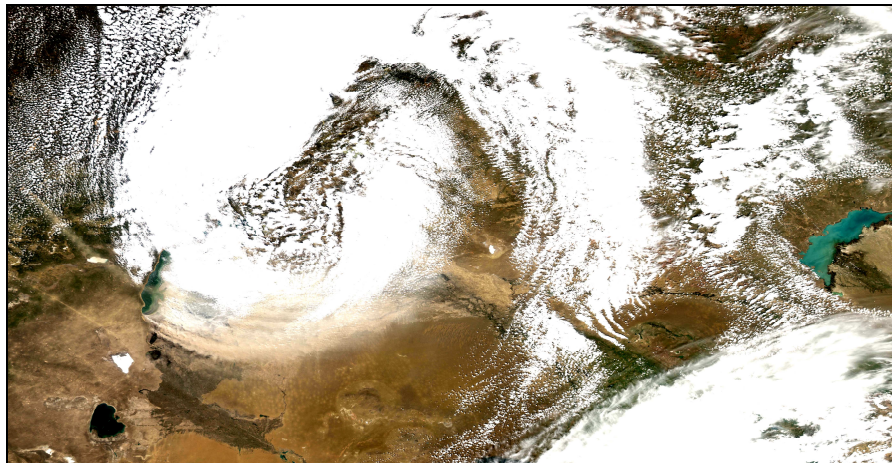
- Метеорологические параметры (число и продолжительность бурь, скорость и направление ветра во время этих явлений).
- Дисперсный состав осушающихся почвогрунтов дна.
- Содержание солей в составе почвогрунтов и в потоке аэрозолей.

Прекращение научного мониторинга за падением уровня Арала и его последствиями в начале 90-х годов 20 века значительно снизило возможность прогноза развития процессов дефляции осушенной части дна моря в настоящее время. Из приведенного выше перечня параметров для современной оценки процессов выветривания мы не располагаем информацией о реальных метеорологических условиях на осушенном дне. В Казахстане М Уялы, М о. Лазарева и М Барса-Кельмес закрыты и не могут давать сведения о процессах пыльных бурь. Работавшей метеостанцией в районе экологической катастрофы на территории Казахстана осталась только одна – Аральское Море, которая удалена от осушенной части дна Большого Арала более чем на 100 км. Неизвестен дисперсный состав осушающихся грунтов дна, содержание солей в составе грунтов и в потоке аэрозолей, отсутствуют измерения потоков массы частиц во время бурь.

Поэтому в настоящее время можно получить картину масштабов выноса Аральского аэрозоля только для отдельных сильных пылесолевых и песчаных бурь лишь путем моделирования процессов ветрового переноса тяжелых быстро оседающих частиц грунта с осушенной части дна водоема (далее для всех этих бурь будем применять один термин – пыльная буря). Сделать это стало возможным благодаря результатам проведенного ранее экспериментального изучения песчаных бурь, достижений их теоретических исследований, успехов гидродинамических методов построения

метеорологических полей давления и скоростей приземного ветра, привлечения информации с искусственных спутников Земли.

Ниже авторами сделана попытка получить количественные характеристики зафиксированной с космического аппарата AQUA спектрорадиометром MODIS сильной пыльной бури 7 мая 2007 г. по информации, размещенной на сайте NASA (рис. 1).



*Рис. 1. Снимок пыльной бури 7 мая 2007 г. в 8 час 40 мин по СГВ. Спутник AQUA.*

Из имеющейся у нас базы космических снимков бурь в Аральском регионе рассматриваемый снимок был выбран по следующим причинам:

- Зафиксированная пыльная буря достаточно мощная, – длина шлейфа выноса составляет около 600 км, ширина – 200 км, высота слоя переноса пыли – 1200...1500 м и площадь – 110 000 км<sup>2</sup>.
- Источником аэрозоля является большая часть поверхности осушенной территории дна моря.
- Пыльные бури такого масштаба с переносом аэрозоля в восточном направлении – относительно редкое явление.

По космическому снимку пыльной бури можно определить границу источника лишь вне подоблачной зоны и с наветренной стороны. Для оценки всей площади источника пыльной бури 7 мая 2007 года были определены наветренные границы источников 9 пыльных бурь в апреле и начале мая 2007 г. Полученные границы были объединены (рис. 2), и, таким образом, получен наиболее вероятный контур источников этой пыльной бури. Учитывая по снимку (рис. 1) направление переноса аэрозоля и контур источника выдувания, фронт переноса бури можно принять равным 200 км.

## Геоморфологическая характеристика источников

Песчаные и пыльные бури являются функциями двух групп параметров, характеризующих соответственно воздушный поток и свойства поверхности, подвергающейся выветриванию. Из них наиболее определяющие интенсивность процесса переноса следующие: скорость ветра, размер частиц, рельеф местности и влажность поверхностного слоя грунтов, наличие растительного покрова.

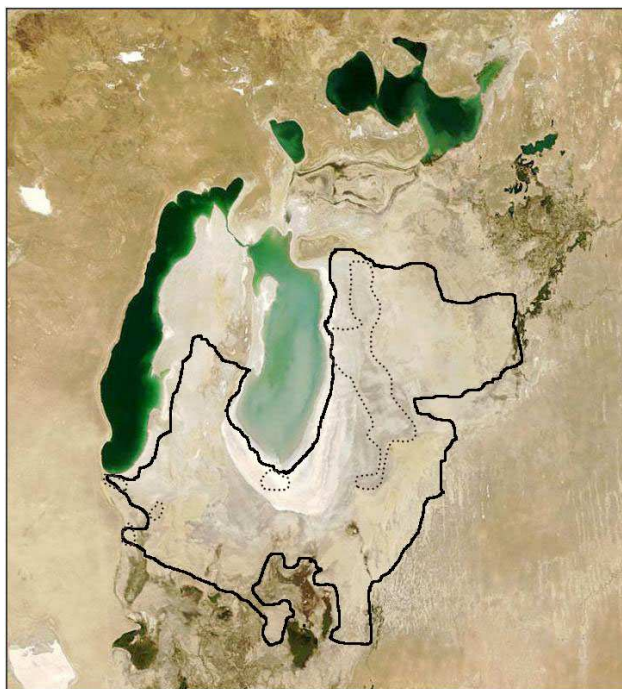


Рис. 2. Площадь источников аэрозоля для пыльных бурь в мае 2007 года. Пунктиром обозначены наиболее интенсивные источники пыления.

Подвижный песок пустынь является полидисперсной средой. Распределение его частиц по размерам чаще всего можно описать логарифмически нормальной функцией с плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{0,43429}{\sigma_{\lg x} x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\lg x - \lg x_0)^2}{2\sigma_{\lg x}^2} \right], \quad (1)$$

где  $x$  – размер песчинок;  $x_0$  – средний геометрический размер частиц;  $\sigma_{\lg x}$  – среднее квадратическое отклонение  $\lg x$  (стандартное геометрическое отклонение). Для описания этого распределения достаточно знать параметры  $x_0$  и  $\sigma_{\lg x}$ , которые легко установить при ситовом методе анализа размеров частиц песка [6, 13, 14].

Основным параметром полидисперсного песка, определяющим физические процессы его взаимодействия с воздушным потоком, является средний геометрический размер частиц  $x_0$ . Наличие дисперсии распределения приводит к тому, что процессы переноса приобретают стохастический характер.

В отношении развития дефляционных процессов на высохшей территории Арала условно можно выделить три типа поверхности:

1. Песчаные массивы территории осушки до 1990 года.
2. Подвижные пески с примесью алевритовой пыли и ракушечника.
3. Ровные солончаковые и алевритовые поверхности.

На основе анализа карт Google Map нами были определены площади районов первого и второго типа (рис. 3).



*Рис. 3. Территории с подвижными формами рельефа. 1, 2 – песчаные массивы (территория осушки до 1990 г.). 3, 4, 5 – подвижные пески с примесью ракушек и илистых фракций. Пунктиром обозначена береговая линия 1960 г.*

Площади массивов составили: 1-го – 2278 км<sup>2</sup>, 2-го – 3166 км<sup>2</sup>, 3-го – 880 км<sup>2</sup>, 4-го – 59 км<sup>2</sup> и 5-го – 1690 км<sup>2</sup>. Контуры массивов выделялись по наличию на поверхности эоловых форм рельефа. Массив 1 и Казахстанская часть массива 2 достаточно хорошо изучена экспедициями

КазНИГМИ в 1980...1992 годах [6, 13, 14]. Это перевеянные барханно-грядовые закрепленные и полужакрепленные пески. Средний геометрический размер этих песков варьирует в широких пределах. Для полосы бывших островов и баров, протянувшейся от дельты Сырдарьи до бывшего Акпеткинского архипелага характерны крупные и очень крупные пески – средний геометрический размер их составляет 200...390 мкм, встречаются и более крупные пески – до 430 мкм. В районе, ограниченном коренным берегом и полосой островов и баров, песок мелкий, средний геометрический размер – 100...120 мкм. Все эти пески хорошо перевеяны, с незначительным содержанием пыли и солей (до 2 %).

В заостренной части (западнее полосы островов и баров) изучение поверхности и дисперсного состава практически не проводилось. Лишь во время выполнения вертолетных маршрутов в 1989 и 1990 гг. было отобрано несколько образцов с поверхности подвижных песков, образовавшихся на плоской поверхности песчано-алевритовых отложений. Для функции распределения частиц по размерам у всех образцов характерна положительная асимметрия, обусловленная значительным количеством пылевой фракции. Наблюдается закономерное уменьшение среднего геометрического размера частиц в южном направлении: от 110 мкм южнее дельты Сырдарьи до 93 мкм восточнее бывшего острова Узункаир.

Современные исследования природно-территориальных комплексов Приаралья с использованием снимков космических аппаратов выполнены Кравцовой [8]. Ею составлена карта природно-территориальных комплексов, на которой охарактеризованы террасы трех уровней, сформировавшиеся 1...2 года назад, 5...6 лет и 30...40 лет назад (рис. 4).

Кравцова по снимкам, полученным в апреле, мае, июле и сентябре 2002 г., впервые составила серию карт сезонных изменений состояния природно-территориальных комплексов. Освоение бывшего морского дна растительностью из-за разреженности покрова на снимках не заметно, но хорошо отображаются сезонные изменения влажности и солености бывшего морского дна.

Кравцова установила, что состояние природно-территориальных комплексов меняется в течение года с просыханием грунта после зимне-весеннего увлажнения. Весной увлажнена широкая полоса террас 1 и 2-ого уровня. Режим засоления грунта также тесно связан с изменением увлажнения. По краю террас, вследствие испарения влаги образуется солевая корка, окаймляющая увлажненную поверхность террас сплошной полосой шириной



2...10 км. По мере высыхания корка становится источником солевых бурь и постепенно разрушается. Через 2...3 месяца она распадается на отдельные фрагменты и находящиеся за ней террасы 3-его уровня покрываются налетом солей. К концу лета остатки солевой корки полностью исчезают [8].

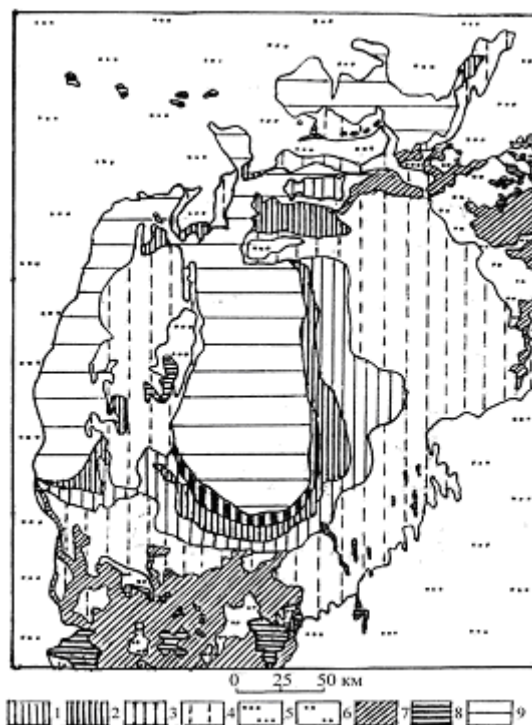


Рис. 4. Карта природно-территориальных комплексов Приаралья.  
По Кравцовой [8].

1 – марши (чередование участков воды и сухого дна). Бывшее морское дно, освободившееся от воды в разное время: 2 – 1...2 года назад – террасы 1-ого уровня (иловые пустоши без растительного покрова, при обсыхании покрывающиеся солевой коркой); 3 – до 5...6 лет назад – террасы 2-ого уровня (суглинисто-иловые пустоши с солончаковой полукустарниковой растительностью, с солевыми корками по краям полос увлажнения, подверженные процессам дефляции и формирования эолового рельефа в начальной стадии); 4 – до 30...40 лет назад – террасы 3-его уровня (песчано-солончаковые пустыни с участками псаммофитно-кустарниковой растительности, чередующимися с солончаками и незакрепленными песками, с развитыми процессами дефляции и формирования эолового рельефа); 5 – глинистые и песчаные пустыни коренной суши с псаммофитно-кустарниковой и саксауловой растительностью; 6 – дельтовые равнины с опустыненной травянистой и кустарниковой растительностью; 7 – тростниковая растительность в дельтах рек и по морским берегам; 8 – солончаки, озера, временные водоемы. 9 – морская акватория.

Параллельно с разрушением первой полосы солевой корки (весенней, наиболее мощной), по мере высыхания низких террас, по краю сужающейся увлажненной полосы образуются новые солевые корки. Сначала они влажные, потом высыхают и подвергаются разрушению процессами дефляции. Автор отмечает, что «Некоторое время существуют одновременно две или даже три полосы солевых корок, каждая из которых находится на разной стадии в цикле формирования по краю увлажненной террасы, высыхания и затем дефляционного разрушения. Таким образом, основные процессы сезонной динамики территории бывшего морского дна связаны с режимом ее увлажнения и засоления, просыханием грунта и образованием, а затем разрушением солевых корок по краю сужающейся увлажненной полосы». Работа Кравцовой наиболее полно освещает качественно динамичный во времени процесс развития солевых бурь на осушенном дне Арала ниже изобаты 20...25 м.

В 2004 году был выпущен отчет по проекту INTAS - АРАЛ - 2000 - 1059 [17]. В отчете представлена ландшафтная карта осушенной части дна Аральского моря, составленная на базе космических снимков (лето 2000 г.). В общих чертах эти исследования перекликаются с работой Кравцовой. Современную прибрежную зону по этой работе можно характеризовать как полого-наклонную равнину, с унаследованными формами морского рельефа. Ее поверхность, бронированная соляной коркой, сложена алевритами, мелкозернистыми заиленными песками, с единичными сведовыми группировками на солончаках маршевых, с интенсивным выпотным засолением, бугорками вспучивания, трещинами усыхания, слабовыраженными флювиальными процессами в приурезовой полосе. Далее, по направлению к островной полосе, это плоская слабонаклонная равнина, сложенная мелкозернистыми песками, алевритами с солончаками приморскими, проявлением площадной дефляции и аккумуляции. И, наконец, непосредственно к островной полосе примыкает разной ширины слаборасчлененная низкобарханная лишенная растительности равнина, сложенная мелкозернистыми песками, с солончаками приморскими с навевным песчаным чехлом и интенсивными дефляционно-аккумулятивными процессами.

Таким образом, в пределы зоны источников пыльной бури 7 мая 2007 года входят участки алевритов с размерами частиц 5...100 мкм, массивы мелкозернистых песков со средним геометрическим размером частиц 100 мкм и менее и солончаки. Размеры частиц на пухлых солончаках Восточного Приаралья, по данным Орловой, составляют от 2,5 мкм до 25 мкм [9].

Из геологической литературы известно, что алевриты представляют собой тонкозернистые пылеватые породы с частицами размером от 100 до 5 мкм (0,1...0,005 мм). По минеральному составу алевритовые породы разделяются на мономинеральные, олигомиктовые и полиминеральные. По внешнему виду алевритовые породы напоминают песчаные, хотя их зернистость заметна только в лупу. По размерам они делятся: крупнозернистый алеврит – 100...50 мкм, среднезернистый – 50...25 мкм, мелкозернистый – 25...10 мкм. Происхождение алевритов морское, озерное, эоловое. Отложения алевритов располагаются на большем удалении от береговой линии бассейна, окаймляя со стороны открытого моря область развития песчаных осадков. Обе эти субформации соответствуют мелководной зоне шельфа. Следует иметь в виду, что наряду с дифференциацией на поверхности дна водоема происходит и смешивание осадочного материала (интеграция), поступающего из разных источников сноса. Между песчаными и алевритовыми отложениями, алевритовыми и глинистыми илами переход постепенный, что приводит к образованию переходных смешанных субформаций – песчано-алеваитовой, алевро-глинистой. Относительно чистые разности с содержанием алевритовой фракции (0,10...0,01 мм) 90 % и более наблюдаются сравнительно редко. В большинстве случаев отмечаются многочисленные вариации количественных соотношений алевритовой фракции с песчаными и пелитово-глинистыми фракциями. Поэтому по гранулометрическому составу алевриты, как правило, разнообразны [2].

На дне осушенного Арала процессы интеграции под воздействием сильных ветров усилились. При восточных ветрах происходит обогащение алевритовых поверхностей мелким песком, при слабых западных – пылеватыми (пелитовыми) частицами размером менее 10 мкм и частицами солей. Во время бурь происходил обратный процесс – вынос наиболее мелких частиц из поверхностных слоев и обогащение алевритовых отложений более крупными зернами песка. Особенно интенсивно этот вынос шел при образовании барханов на алевритовых поверхностях дна, которые хорошо видны на картах Google Map. Длительные эоловые процессы переноса приводят к постепенному смещению распределения частиц как алевритовых, так и песчаных отложений по размерам в область более крупных размеров.

Отсутствие информации о гранулометрическом составе алевритовых отложений на дне Арала заставило нас задать его для своих дальнейших расчетов априори. На рис. 5 приведены две функции логарифмически нормального распределения частиц алевритов по

размерам с параметрами:  $x_0 = 50$  мкм,  $\sigma_{\lg x} = 0,23$  – для верхней кривой распределения и  $x_0 = 35$  мкм,  $\sigma_{\lg x} = 0,27$  – для нижней. Далее для этих двух вариантов распределений частиц по размерам будут выполнены расчеты характеристик переноса ветром масс алевритовых отложений.

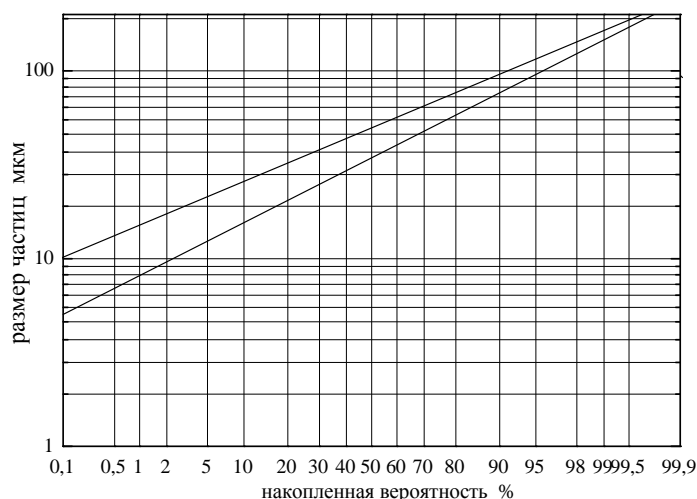


Рис. 5. Кривые распределения алевритовых частиц по размерам, заданные априори, со средним геометрическим размером  $x_0 = 50$  мкм,  $\sigma_{\lg x} = 0,23$  и  $x_0 = 35$  мкм,  $\sigma_{\lg x} = 0,27$ .

### Синоптическая ситуация, приведшая к образованию сильных ветров и пыльной бури 7 мая 2007 г. в районе Арала

Детальное описание синоптической ситуации при образовании пыльной бури 6 – 7 мая 2007 г. дано в статье Чередниченко в этом же номере журнала [16]. Синоптическая ситуация, предшествующая пыльной буре, заключалась в том, что над первым естественным синоптическим районом начался процесс перестройки западного синоптического процесса по типу 3 в северо-западный, сопровождавшийся усилением меридиональной составляющей циркуляции атмосферы и увеличением горизонтальных барических градиентов у земли.

Авторы [11, 12, 15], описывая западный процесс, подтип 3, пишут следующее: «Наиболее опасна в смысле бурного циклогенеза в зоне Аральского моря или в Центральном Казахстане такая ситуация, когда полярная высотная фронтальная зона (ПВФЗ) над Черным морем, Каспием и западом Средней Азии очень интенсивная, а над востоком Средней Азии и Восточным Казахстаном располагается меридиональный теплый высот-

ный гребень. В этом случае над Центральным Казахстаном расхожимость циклонически изогнутых изогипс и изотерм и переход их циклонической кривизны в антициклоническую приводит к сильному динамическому падению давления у земли. В районе к северу от Аральского моря развивается глубокий циклон, местами переходящий в штормовой. Он развивается из циклонической волны».

Образование сильной пыльной бури и её продолжение в течение двух суток явилось следствием усиления меридиональности в завершающемся Западном типе синоптического процесса, сопровождавшимся адвекцией тепла на район Северного Каспия и Арала. Это вызвало динамическое падение давления в этом районе и его рост над ЮВ европейской территории России (ЕТР) и западнее Каспия, обусловленное усилением меридианальности и смещением холодной воздушной массы к ЮЮВ.

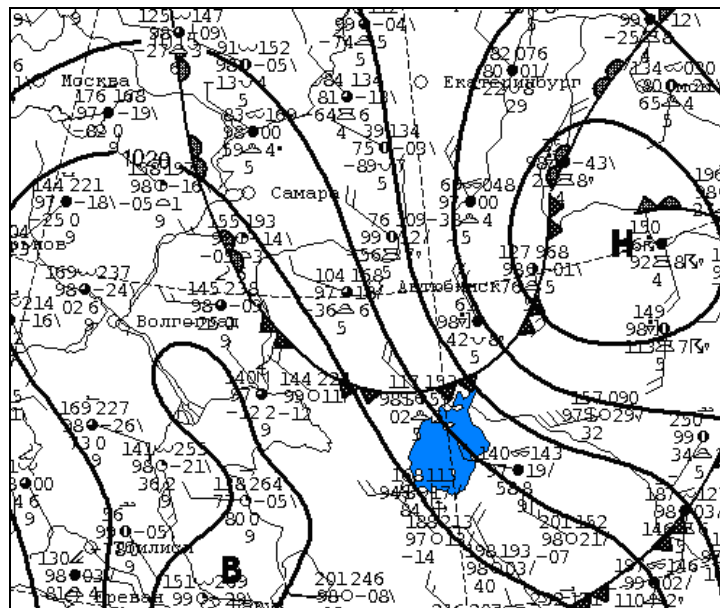


Рис. 6. Фрагмент приземной карты погоды за 07.05.2007 г. Срок 12 ч.

Произошло сближение двух барических образований, антициклона западнее Каспия и циклона восточнее Арала, и появлению больших градиентов давления в регионе (рис. 6). Определенную роль сыграли Уральский хребет и Мугоджары, задержавшие перемещение воздушной массы к востоку, что так же способствовало сгущению изогипс западнее их [10, 16]. Ровная подстилающая поверхность позволила образоваться сильному ветру, поднять с осушенной поверхности слой пыли и соли, и перенести его на значительное расстояние.

## **Вычисление метеорологических полей давления, скорости ветра и динамической скорости над осушенной частью Большого Арала**

Отсутствие информации о пыльно-солевых бурях на дне Арала заставило нас обратиться к гидродинамическим методам построения метеорологических полей для этого региона. Для этого была использована мезомасштабная гидродинамическая модель WRF. Она в настоящее время используется для большого круга задач исследования окружающей среды, таких как численный прогноз погоды, моделирование текущего и будущего климата, взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью, распространение примесей различного генезиса [[http://wrf-model.org/plots/realtime\\_main.php](http://wrf-model.org/plots/realtime_main.php)] [19, 20]. Модель WRF представляет собой гибкую и современную систему моделирования атмосферы.

Широкий спектр физических и динамических опций модели отражает опыт практического использования и вклад научного сообщества. Она учитывает конфигурацию многих современных многопроцессорных систем и поэтому является эффективной и удобной для использования на этих системах. Модель разрабатывается международным сообществом научных организаций, и представляет собой систему модулей:

- модуль подготовки начальных и граничных данных (WRF Preprocessing System);
- собственно решающее ядро (Advanced Research WRF);
- модуль постпроцессинга (WRF Postprocessing System).

Большая часть модели (собственно вся математика) реализована на языке FORTRAN с использованием библиотеки MPI. На языке C написаны модули для работы с данными [[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3)].

Для исследуемого в статье случая пыльной бури в районе Приаралья 7 мая 2007 года модель использовалась для расчета различных параметров атмосферы. Особый интерес представляет атмосферная турбулентность – хаотические пульсации (флуктуации) скорости ветра, температуры и влажности воздуха, которые играют существенную, а в ряде случаев определяющую роль в формировании режима пограничного слоя атмосферы, способствуя интенсивному перемешиванию масс воздуха, переносу тепла, влаги, количества движения, а также диффузии различных веществ с поверхности Земли в атмосферу. Одним из важнейших параметров для описания процессов подъема и переноса примесей с поверхности земли является динамическая скорость или скорость трения – масштаб скорости в приземном слое воздуха [3, 6, 13, 18].

В модели WRF для описания этих процессов применяется теория подобия Монина-Обухова, разработанная в 50-х годах для приземного слоя воздуха. Эта теория позволяет связать данные о средних значениях скорости ветра, температуры и влажности на нескольких высотах вблизи поверхности земли с величинами турбулентных потоков. В качестве начальных и граничных условий модели использовались данные повторного анализа. Проект «Повторный анализ» – это совместная работа NCEP (Национальный центр США прогноза окружающей среды) и NCAR (Национальный центр США исследования атмосферы) с целью создания 40-летних архивов глобальных атмосферных полей для различных задач окружающей среды, в частности, для исследования текущего климата. Проект предусматривает восстановление данных на основе контактных наблюдений у поверхности суши и океана, измерений радиозондов, самолетных, спутниковых и других данных и охватывает период с 1951 года по настоящее время [<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2>].

Повторный анализ выполнен в NCEP с использованием глобальной спектральной модели T62 (разрешение – 209 км) на 28 вертикальных уровнях. Это та же модель, что используется в NCEP в оперативной практике, начиная с декабря 1994. Модель имеет 5 уровней в пограничном слое и приблизительно 7 уровней на высотах более 100 гПа. Модель включает параметризацию всех главных физических процессов, т.е. крупномасштабную конвекцию, крупномасштабные осадки, мелкомасштабную конвекцию, перемещение гравитационных волн, радиацию с суточным циклом при учете облачности, физику пограничного слоя, гидрологию поверхностных вод суши, вертикальные и горизонтальные процессы диффузии.

Для моделирования динамических характеристик атмосферы в интересующем нас регионе были определены два домена с размерами (100×142) и (133×199) точек с пространственным разрешением 18 и 6 км соответственно. Домен 2 характеризуется двунаправленной вложенностью, т.е. полученные в нем результаты расчетов используются для корректировки параметров внешнего домена. На рис. 7 представлены расчетные области.

В результате моделирования в расчетных доменах были получены ежечасные детальные карты барической топографии, поля приземного ветра и динамической скорости  $u_*$  за 48 часов, начиная с 00 час 6 мая до 00 час 8 мая.



Рис. 7. Расчетные домены: 1 – внешний домен (границы ограничены рамкой рисунка) и 2 – вложенный домен.

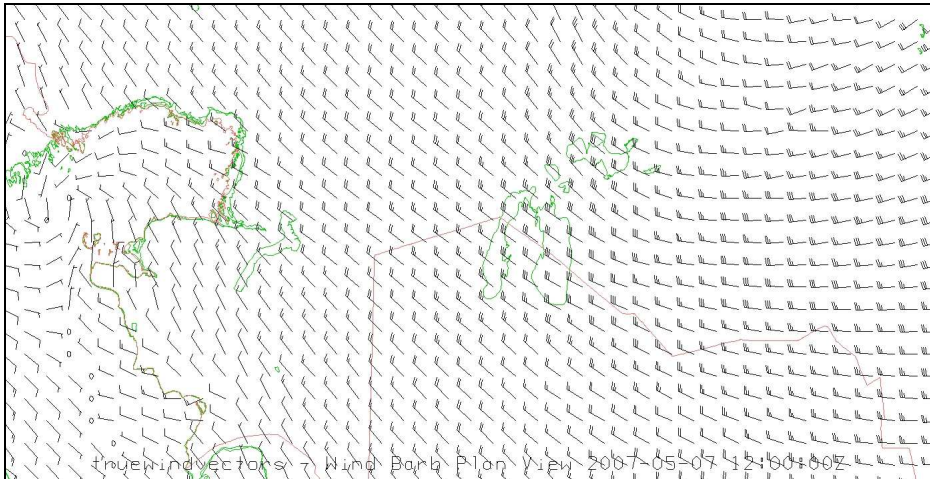


Рис. 8. Поле ветра в первом домене за 12 час 00 мин СГВ 7 мая 2007 г.

На рис. 8 в качестве примера приведена карта поля ветра за 12 час 7 мая СГВ для первого домена, а на рис. 9 – карта поля ветра и динамической скорости потока для второго домена. На картах второго домена была выделена площадь Большого Арала, где дано описание изменения во времени динамической скорости ветра, что позволило определить длительность этой очень сильной бури, во время которой  $u_*$  над осушенной частью дна достигала значений 0,8...1,1 м/с.



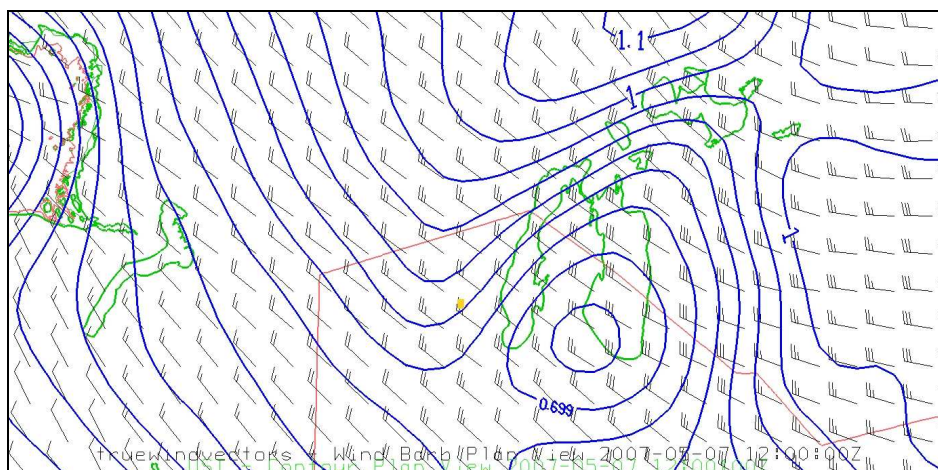


Рис. 9. Поле ветра и изолинии динамической скорости потока во втором домене за 12 час 00 мин СГВ 7 мая 2007 г.

Значительная изменчивость динамической скорости наблюдалась не только во времени, но и по территории осушенной части дна. Очевидно, что модель достаточно чувствительна к геоморфологическим особенностям новых территорий суши – чинку западного берега и бывшим низким островам Арала (рис. 10 и 11).

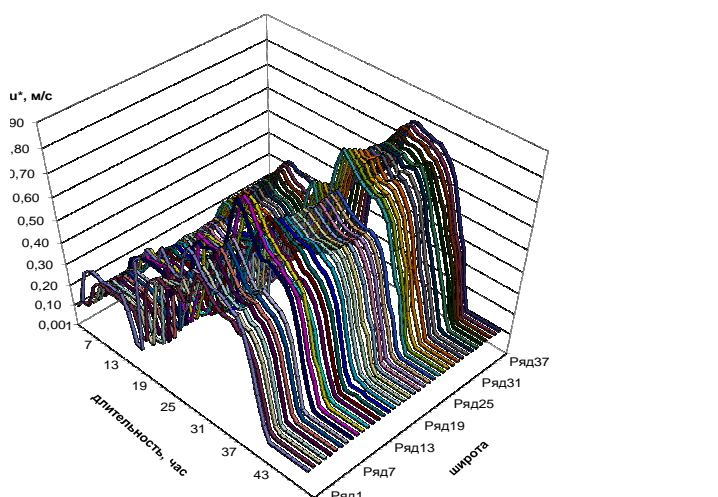


Рис. 10. Фрагмент картины пространственно-временного изменения динамической скорости над источником аэрозоля во время бури 06 и 07 мая. Линии изменения  $u_*$  проведены через 6 км, начиная от самой южной границы источника выдувания частиц.

На рис. 10 приведен фрагмент картины пространственно-временного изменения динамической скорости над источником аэрозоля во время бури. Полученные изменения динамической скорости во времени позволили определить продолжительность переноса донных отложений ветром. Как показано в [6, 13] критическое значение динамической скорости  $u_{*k} = 0,15$  м/с, при достижении которого начинается ветровой перенос частиц размером 70...100 мкм. Более мелкие частицы начинают самостоятельное движение в потоке воздуха при больших значениях скорости. Но так как в составе алевритовых частиц достаточное количество частиц размером 70 мкм и более, то выдувание донных отложений за счет бомбардировки поверхности этими, наиболее легко вовлекаемыми в движение частицами, должно начинаться при  $u_{*k} = 0,15$  м/с. Рис. 11, на котором приведено изменение динамической скорости во времени в трех различных районах дна Арала, позволяет определить продолжительность наблюдаемой бури и её интенсивность.

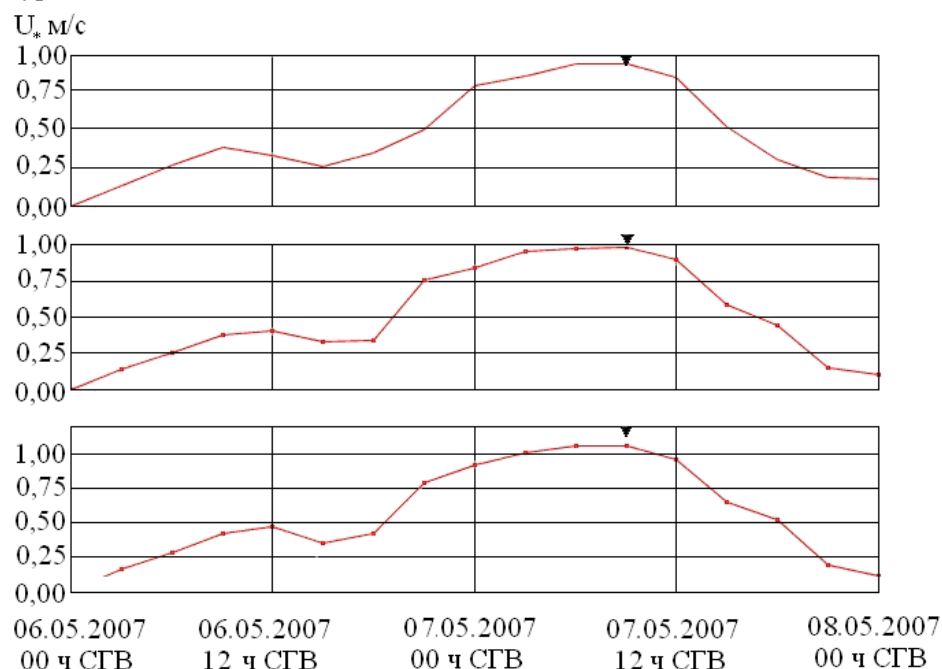


Рис. 11. Временной ход динамической скорости за 6 и 7 мая 2007 г. в трех различных районах дна Арала. Время по Гринвичу. Символ над кривой  $\blacktriangledown$  указывает на момент снимка бури (рис. 1).

Длительность ветрового переноса донных отложений оказалась равной 46 часам. Слабая буря началась около 6 час утра местного времени

(02 час СГВ) 6 мая. Динамическая скорость постепенно росла и достигла к середине дня на большой площади сухого дна значений 0,3...0,4 м/с, местами до 0,45 м/с. В 16...17 час скорость местами снизилась до значений ниже критической. Буря ослабела, перенос происходил не на всей площади источника. В 19 час динамическая скорость резко выросла и достигла 0,5...0,6 м/с. Началась очень сильная пыльная буря, вызванная, по видимому, прохождением фронтального раздела. В течение нескольких часов (2...3 час) скорость ветра была устойчивой, а затем за прошедшим фронтом вновь произошло усиление скорости потока, динамическая скорость возросла, и её максимальные значения достигли 0,8...1,1 м/с. На момент максимального усиления ветра приходится снимок бури из космоса (рис. 1). Этот сильный ветер продолжался до 16 час 7 мая, а затем началось медленное его затухание. Через 12 часов динамическая скорость снизилась на большей части дна Арала до значений, меньших критического. Но на некоторых участках слабый перенос ещё продолжался. За 14 проведенных на дне Арала экспедиций нам не приходилось встречаться с бурей такой силы. Самая сильная песчаная буря, измерения параметров которой нам удалось провести в 1984 г., проходила при  $u_*$  в интервале значений 0,7...0,85 м/с и была продолжительностью около 29 час.

Теперь, зная основные параметры пыле-солевой бури, можно определить масштабы переноса массы аэрозолей за время этого стихийного явления погоды и выявить отличие её строения от ранее изученных песчано-солевых бурь Арала [6, 13].

#### **Определение масштабов переносимых ветром масс частиц твердой фазы потока во время бури 6 – 7 мая 2007 г.**

Наиболее удобной величиной при определении масс песка или других аэрозолей, перемещаемых воздушными потоками, является твердый расход  $q$  – масса твердой фазы, переносимая в единицу времени через единицу площади поперечного сечения потока, кг/(м<sup>2</sup>·с). Выполненные нами ранее измерения профилей твердого расхода во время бурь над песками с логарифмически нормальной функцией распределения частиц по размерам со средним геометрическим размером песчинок, изменявшимся в интервале 90...240 мкм, показали, что они аппроксимируются степенной функцией

$$q(z) = q_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-0,57 \frac{w_g}{u_*}}, \quad (2)$$

которая позволяет определить твердый расход песка для любой высоты по его измерениям на одном уровне  $z_1$ , по скорости ветра и параметрам функции распределения частиц песка по размерам на поверхности. В формуле (2)  $q_1$  – твердый расход на высоте  $z_1$ , кг/(м<sup>2</sup> с);  $w_g$  – скорость свободного падения частиц (гидродинамическая крупность частиц), м/с,  $u_*$  – динамическая скорость потока (скорость трения), м/с.

Наши исследования проводились в приземном слое атмосферы от поверхности песка до высоты 16 метров. На первой стадии этих работ измерения выполнялись над спланированной ровной песчаной поверхностью. Последующие работы уже делались над естественными поверхностями, состоящими из низких барханных цепей с высотами гряд 0,4...0,8 м. Аналитическое описание профилей твердого расхода песка в приземном слое атмосферы над обоими типами поверхностей оказалось одинаковым [6, 13].

Для развитых пыльных бурь в условиях стационарного во времени и однородного в пространстве потока с мелкими взвешенными монодисперсными частицами пыли размером порядка нескольких микрометров Баренблатт и Голицын [4, 18] ранее теоретически получили следующее выражение для профиля объемной концентрации

$$s(z) = s_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-\frac{w_g}{\alpha_0 \cdot \kappa \cdot u_*}}, \quad (3)$$

здесь  $\alpha_0 = k_m/k_\tau$  – отношение коэффициентов обмена массы и импульса,  $\kappa = 0,4$  – постоянная Кармана.

Профили твердого расхода (2) над реальным полидисперсным песком, который превышает по размерам исследованные Баренблаттом и Голицыным аэрозоли на один-два порядка, по своему виду оказались аналогичны их профилям объемной концентрации. Показатель степени в формуле (2) несколько отличается от теоретически полученного Баренблаттом и Голицыным в выражении (3), но это различие является кажущимся, так как получены они для частиц с сильно отличающимся размером.

Интенсивные песчаные и пыльные бури проходят при нейтральной температурной стратификации [6, 13]. Поэтому отношение коэффициентов обмена массы и импульса в формуле (3)  $\alpha_0 = k_m/k_\tau$  можно принять равным единице, и тогда показатель степени в (3) будет равен

$$w_g / (\alpha_0 \cdot \kappa \cdot u_*) = 2,5 \cdot w_g / u_* . \quad (4)$$

Авторы теории развили её для частиц размером не более нескольких мкм, подчиняющихся закону Стокса, и причиной их переноса является турбулентная диффузия. Поскольку аэрозоль монодисперсный, то  $w_g$  в (3) не изменяется с высотой.

Во время песчаных бурь размер переносимых ветром частиц изменяется с высотой. Поэтому у нас в формуле (2)  $w_g$  берется для среднего геометрического размера частиц песка  $x_0$  на поверхности. Он, чаще всего,  $> 100 \dots 120$  мкм и  $w_g$  у частиц этого размера  $\geq 0,8 \dots 1$  м/с. Крупные частицы  $> 70$  мкм переносятся ветром в приповерхностном слое сальтации ниже 0,5 м. В турбулентном диффузионном перемещении выше слоя сальтации участвуют уже лишь частицы размером преимущественно  $\leq 60 \dots 70$  мкм. У них  $w_g$  значительно меньше, чем у частиц поверхностного слоя песка и достигает значений 0,2...0,4 м/с. Поэтому, отношение показателя степени для профиля объемной концентрации Баренблатта-Голицына по (3), в которой  $w_g = 0,2$  м/с, к показателю степени формулы (2), в которой  $w_g = 0,8$  м/с, близко к единице.

Таким образом, наши исследования профилей твердого расхода песка в приземном слое атмосферы при бурях подтверждают результаты теории Баренблатта-Голицына, полученные ими для стационарного турбулентного течения термически стратифицированной пылегазовой суспензии [3, 18]. Это позволяет распространить полученные экспериментально физические закономерности песчаных бурь на ветровые потоки с более мелкими частицами.

Получим оценки профилей твердого расхода массы алевритовых частиц в ветровом потоке, общий расход массы твердой фазы во всей толще приземного слоя атмосферы и вынесенную за пределы контуров источников массу алевритовых частиц, которые после окончания бури выпали на поверхность региона Приаралья.

По формуле (2) рассчитаем вертикальные профили твердого расхода массы частиц в приземном слое атмосферы для динамической скорости потока  $u_* = 0,8$  м/с, которая наблюдалась продолжительное время на большей части площади источников 7 мая. Для её использования необходимо знать ещё два параметра:  $w_g$  и  $q_1$ . Ниже приведены значения скоро-

сти свободного падения частиц  $w_g$  для частиц различного размера с плотностью  $2,65 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  [6, 13]

$x_0$ , 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 воспользоваться для его определения полученной нами зависимостью твердого расхода песка на высоте 1 м от динамического аналога числа Фруда

$$q_1 = 1,09 \cdot 10^{-9} \cdot Fr_*^{2,42}, \quad (5)$$

где  $Fr_*$  – динамический аналог числа Фруда:  $Fr_* = u_*^2 / (g \cdot x_0)$ . Здесь  $g$  – ускорение силы тяжести. Используя (4), можно получить твердый расход на высоте одного метра  $q_1$  в широком интервале скоростей ветра от 6 до 20 м/с [6, 13].

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. 12 представлены результаты вычислений профилей твердого расхода массы алевритовых частиц в пределах приземного слоя атмосферы при динамической скорости  $u_* = 0,8$  м/с (кривые 4 и 5). Здесь же приведены результаты измерений  $q(z)$  во время песчаных бурь 1984 г. для значений  $u_* = 0,6$  и  $0,65$  м/с над поверхностью, сложенной из частиц со средним геометрическим размером  $x_0 = 120$  мкм и  $\sigma_{\lg x} = 0,11$  (кривые 1 и 2), и рассчитанный профиль для  $u_* = 0,8$  м/с (кривая 3). На рисунке хорошо видно различие в переносе частиц в приземном слое атмосферы во время пыльных и песчаных бурь.

Первые два профиля  $q(z)$  получены нами во время песчано-солевой бури 12.06.1984 г. На рисунке видно хорошее согласование измеренных значений твердого расхода с аппроксимирующими степенными функциями (2). Кривая (3) рассчитана для той же динамической скорости потока, которая характерна для бури 7.05.2007 г. над новыми алевритовыми поверхностями дна Арала.

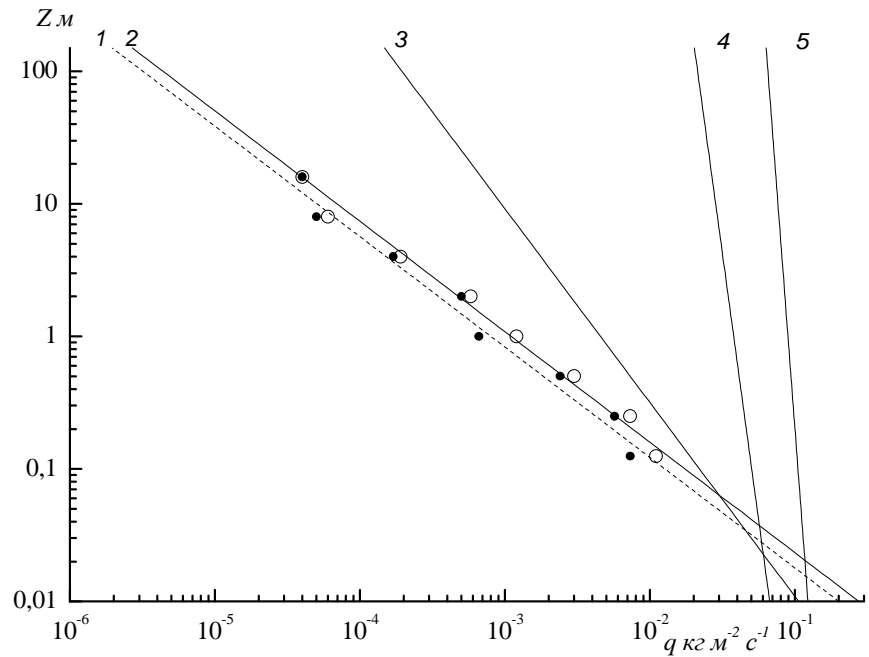


Рис. 12. Вертикальные профили твердого расхода песка над поверхностью со средним геометрическим размером песчинок  $x_0 = 120$  мкм при динамической скорости  $u_* = 0,60$  м/с (1),  $u_* = 0,65$  м/с (2),  $u_* = 0,8$  м/с (3) и алевритовых частиц во время бури при  $u_* = 0,8$  м/с с  $x_0 = 50$  мкм (4),  $x_0 = 35$  мкм (5).

Все пять профилей твердого расхода экстраполированы до верхней границы приземного слоя атмосферы, которая достигает при этих скоростях высоты  $h = 160...170$  м [13]. Каковы же различия в переносе гигантских аэрозолей во время песчано-солевых бурь от поведения аэрозоля алевритового происхождения при пылевых бурях? Обращает на себя внимание значительно более быстрое падение с высотой переноса массы потока во время песчаной бури, по сравнению с бурей над алевритовой поверхностью дна Арала. Твердый расход массы частиц на высоте 150 м над песчаной поверхностью уменьшается по сравнению с расходом на уровне 0,1 м при  $u_* = 0,60$  м/с в  $\approx 5000$  раз, при  $u_* = 0,65$  м/с – в  $\approx 4300$  раз, при  $u_* = 0,8$  м/с – в 130 раз.

Над алевритовой поверхностью это отношение значительно меньше, при  $u_* = 0,8$  м/с и  $x_0 = 50$  мкм расход массы уменьшается в этом слое всего лишь в 2,4 раза, для  $x_0 = 35$  мкм – в 1,75 раза. Таким образом, более

мелкие частицы заполняют весь приземный слой с мало изменяющейся с высотой переноса концентрацией. И это характерно не только для больших скоростей ветра. Расчеты для  $u_* = 0,3$  м/с показали, что и при умеренных скоростях ветра, когда над песчаной поверхностью перенос частиц происходит в виде поземки, над алевроитовыми поверхностями наблюдается пыльная буря с заполнением всей толщи приземного слоя атмосферы с изменением отношения расходов твердой фазы потока  $\frac{q(0,1 м)}{q(150 м)}$  от  $\approx 4$

над поверхностью с  $x_0 = 35$  мкм до  $\approx 20$  – над  $x_0 = 50$  мкм. Это означает, что дефляция новых осушенных территорий должна была привести к увеличению числа пыле-солевых бурь и увеличению дальности выноса Аральского аэрозоля, что и подтверждается космическими снимками этого региона после 2000 г.

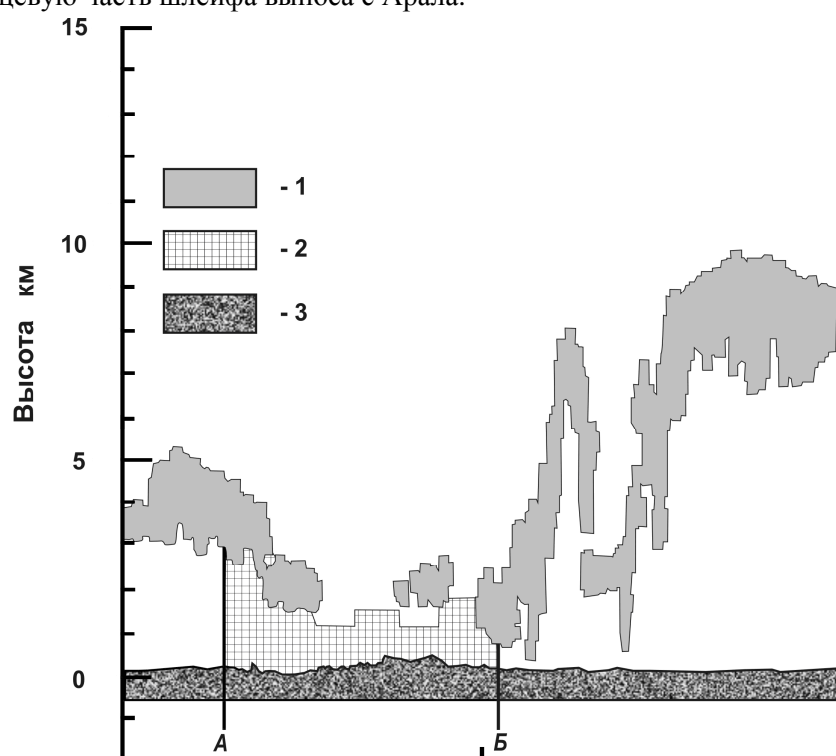
Современные космические аппараты позволяют исследовать распространение аэрозольных потоков при бурях. Одним из таких спутников является CALIPSO, который входит в орбитальную группировку полярных спутников A-Train, включающих AQUA, AURAa, (CNES) PARASOL и CloudSat. Он позволяет получить уникальную информацию о вертикальной структуре облаков и распределения аэрозоля в атмосфере, как минерального, так и промышленного происхождения. CALIPSO – американо-французский исследовательский спутник, запущенный 28 апреля 2006 г. и расшифровывается как Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation. Над одной и той же территорией земной поверхности CALIPSO пролетает на 2 мин 45 сек позже AQUA, т.е. мы имеем практически синхронные данные с двух космических аппаратов.

На спутнике CALIPSO установлены следующие инструменты: CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) – лидар для наблюдения облаков и аэрозолей. В качестве источника излучения используется импульсный лазер, работающий в зеленом диапазоне спектра. Он может измерять высоту облаков и аэрозольных слоев с точностью до 30 м. Прибор предназначен для получения вертикальных профилей упругого рассеяния от облачного слоя в различное время суток, а также для описания распределения в нём водяных паров, аэрозолей и пыли. Он обладает высокой чувствительностью, позволяющей исследовать так называемые «невидимые облака»; IIR (Imaging Infrared Radiometer) – инфракрасный радиометр, предназначенный для измерения уровня излучения в различных



диапазонах ИК-спектра; WFC (Wide-Field Camera) – широкоугольная камера высокого разрешения.

На рис. 13 показан фрагмент вертикального профиля облачности и аэрозольного слоя, полученный со спутника CALIPSO при пролете его над территорией Аральского региона 7 мая 2007 г. в 8:40 СГВ, а на рис. 14 – космический снимок пыльной бури со спутника AQUA, выполненный в то же время. На этом рисунке так же показана проекция траектории пролета спутника CALIPSO. Направление движения спутников – с юга на север с азимутом 345°. Длина участка траектории (АБ), на котором отмечено содержание аэрозоля составляет 620 км, начинается этот участок в районе г. Туркестана и заканчивается севернее западных отрогов гор Улутау. Расстояние от источника пыли до проекции траектории на земную поверхность составляет по нормали 460 км. Лидар CALIPSO зафиксировал уже концевую часть шлейфа выноса с Арала.



Широта	42,92	48,94	54,91
Долгота	68,04	65,81	63,08

Рис. 13. Фрагмент профиля вертикального зондирования атмосферы со спутника CALIPSO 7 мая 2007 г. 8:40 СГВ.

1 – облака, 2 – аэрозоль, 3 – подстилающая поверхность. АБ – участок траектории с аэрозольным загрязнением на рис. 7.

Высота аэрозольного слоя составляет 1,2...1,5 км, на юге она достигает 3 км, что связано, по-видимому, с восходящими потоками воздуха под кучевыми облаками над горами Каратау. Информация с CALIPSO подтверждает, что над равнинными районами аэрозольный слой, сформированный пыльной бурей, не превышает верхней границы пограничного слоя атмосферы. Над горами высота аэрозольного слоя увеличивается из-за развития мощных вертикальных движений в потоке воздуха.

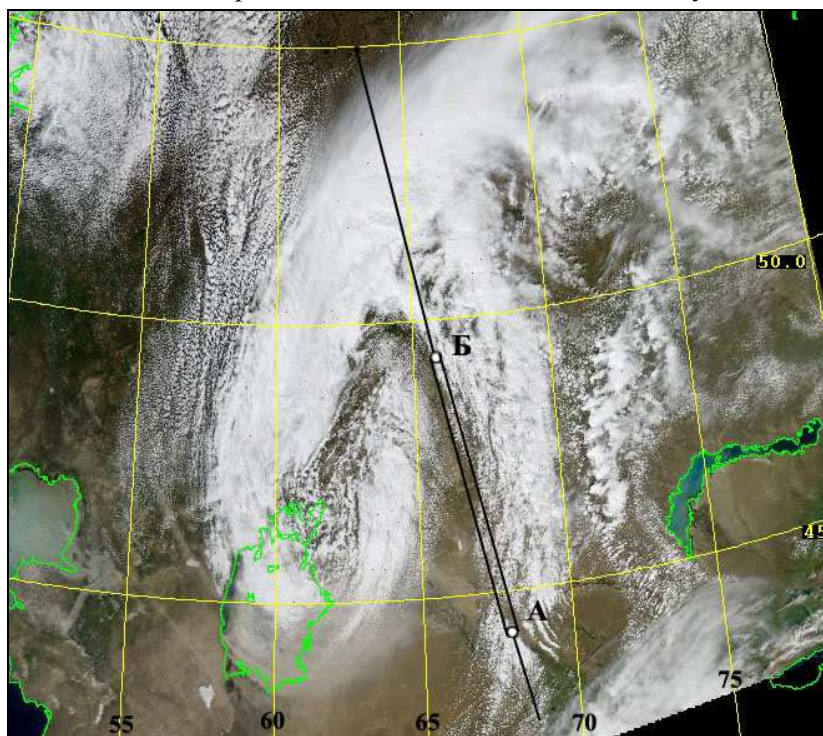


Рис. 14. Пыльная буря 7 мая 2007 г. 8:36 СГВ. Линией обозначена траектория спутника CALIPSO. АБ – участок, на котором отмечено содержание пыли (см. рис. 13).

Для определения источника массы алевритовых частиц, вынесенной за пределы контура, необходимо знать полный расход твердой фазы потока  $Q_z = \int_0^H q(z) dz$ , т.е. всю массу частиц, переносимую ветром за единицу времени в слое высотой от поверхности ( $z = 0$ ) до верхней границы аэрозольного слоя ( $z = H$ ) через единицу фронта потока (м).

Измерения с CALIPSO подтверждают ранее выполненные исследования украинских метеорологов. Анализ авиационного зондирования нижних слоев тропосферы во время сильных пыльных бурь на Украине

Волевахой с соавторами [5] обнаружил существование инверсий температуры на верхней границе пограничного слоя атмосферы, препятствующих проникновению пыли выше этого запирающего слоя. Под этим слоем происходит формирование струйных течений с большими скоростями потока. Это позволяет предположить, что верхняя граница подъема пыли во время исследуемой бури не превышала высоты пограничного слоя атмосферы, которая, как известно, приближенно равна десяти высотам приземного слоя, т.е. можно принять  $H = 10h \approx 1,5$  км для динамических скоростей  $u_*$  в интервале значений 0,6...0,8 м/с.

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 уверенностью экстраполировать полученные профили  $q(z)$  выше 150...170 м. Но другого выхода у нас нет –  $q(z)$  выше приземного слоя никто не исследовал.

Представленные на рис. 7 вертикальные профили твердого расхода аппроксимируются следующими функциями:

$$q(z) = 0,0008 \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-1,14} \quad \text{для } u_* = 0,6 \text{ м/с и } x_0 = 120 \text{ мкм}, \quad (6)$$

$$q(z) = 0,0011 \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-1,2} \quad \text{для } u_* = 0,65 \text{ м/с и } x_0 = 120 \text{ мкм}, \quad (7)$$

$$q(z) = 0,00455 \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-0,684} \quad \text{для } u_* = 0,8 \text{ м/с и } x_0 = 120 \text{ мкм}, \quad (8)$$

$$q(z) = 0,09 \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-0,07} \quad \text{для } u_* = 0,8 \text{ м/с и } x_0 = 35 \text{ мкм}, \quad (9)$$

$$q(z) = 0,037 \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-0,145} \quad \text{для } u_* = 0,8 \text{ м/с и } x_0 = 50 \text{ мкм}, \quad (10)$$

К этим уравнениям профилей  $q(z)$  запишем ещё одно для небольших значений динамической скорости  $u_* = 0,3$  м/с при переносе ветром массы алевритовых грунтов с  $x_0 = 50$  мкм:

$$q(z) = 0,00136 \left( \frac{z}{z_1} \right)^{-0,184} \quad (11)$$

Для получения общего расхода масс переносимых ветром частиц было выполнено численное интегрирование этих функций в слоях 0,01...150 м и 0,01...1500 м, что позволило получить оценку переносимой массы частиц и в слое 150...1500 м как над песчаными, так и алевритовыми поверхностями. Результаты интегрирования уравнений (6)...(11) представлены в таблице.

Таблица

Интегральное содержание массы частиц в различных слоях пограничного

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

Уравнение $q(z)$	Динамическая скорость $u_*$ , м/с	Общий расход в слое, кг·м <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>		Общий расход в слое 150...1500 м, кг·м <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>
		0,01...1500 м	0,01...150 м	
Песчаная поверхность $x_0 = 120$ мкм, $\sigma_{lg,x} = 0,11$				
6	0,6	0,0802	0,013	0,0672
7	0,65	0,143	0,021	0,122
8	0,80	0,1858	0,0692	0,1166
Алевритовая поверхность $x_0 = 35$ мкм, $\sigma_{lg,x} = 0,27$				
9	0,80	87,01	10,22	76,79
Алевритовая поверхность $x_0 = 50$ мкм, $\sigma_{lg,x} = 0,23$				
10	0,80	22,49	3,14	19,35
11	0,30	0,6515	0,0994	0,5521

Рассмотрим количественные различия переноса масс песчаных частиц в пограничном и приземном слоях от более мелкодисперсного алевритового аэрозоля. Анализ полученных результатов указывает на более интенсивный перенос массы алевритовых частиц ветром во время пыльных бурь, по сравнению с аналогичным процессом над песчаными поверхностями.

При одинаковой динамической скорости  $u_* = 0,8$  м/с общий расход массы у частиц с  $x_0 = 35$  мкм превышает в приземном слое (0,01...150 м) расход массы частиц с  $x_0 = 50$  мкм в 3,2 раза, в пограничном слое атмосферы (0,01...1500 м) – в 3,9 раза и, наконец, в слое 150...1500 м – в 4 раза.

Для алевритов характерен перенос значительно большей массы частиц выше приземного слоя атмосферы и быстрое заполнение всего пограничного слоя атмосферы (рис. 15). Ещё одна особенность процесса дефляции алевритовых поверхностей заключается в том, что ветровой перенос над ними происходит только в виде пыльных бурь, так как и при небольших скоростях ветра мелкие аэрозоли также заполняют весь приземный и пограничный слои атмосферы. Это хорошо видно по результатам вычислений для  $u_* = 0,30$  м/с. Над песчаными же поверхностями при этом значении  $u_*$  частицы перемещаются только в приповерхностном слое ниже 2 м, т.е. перенос идет в виде поземка.



Рис. 15. Снимок надвигающейся пыльной бури ([geo.1september.ru](http://geo.1september.ru)).

На взвешивание крупных частиц песка и перенос их из приповерхностного слоя сальтации в верхние слои приземного и пограничного слоя атмосферы затрачивается больше турбулентной энергии потока, чем на более мелкие частицы алевритов. Это приводит к значительному увеличению общего расхода массы алевритовых частиц при одинаковых скоростях ветра. В приземном слое при  $u_* = 0,8$  м/с общий расход массы над песчаной поверхностью в 150 раз меньше его значения над алевритовой поверхностью с  $x_0 = 35$  мкм и в 45 раз – над алевритовой поверхностью с  $x_0 = 50$  мкм. Выше приземного слоя переносимая масса частиц над песчаным источником в 640 и 160 раз соответственно меньше, чем над алеври-

тами. Для всего пограничного слоя это различие несколько меньше: 450 раз – для  $x_0 = 35$  мкм и 120 раз – для  $x_0 = 50$  мкм.

Полученные в экспедициях 1980...1998 гг. массивы общих расходов песка позволили найти его зависимость от числа Фруда:

$$Q_z = f(u_*^2 / gx_0),$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $x_0$  – средний геометрический размер частиц песка на деятельной поверхности [13].

Зависимость  $Q_z$  от  $u_*$  рассматривалась и рассматривается на Западе в качестве детерминированной, начиная с классических исследований Багнольда. Анализ полученных нами больших массивов значений общего расхода песка во время бурь показал, что эта зависимость имеет стохастический характер. И это понятно, так как  $Q_z$  зависит не только от  $u_*$ , но и от большого числа других параметров. Для климатических расчетов были получены зависимости различной накопленной вероятности (обеспеченности) [13]. В своих расчетах мы воспользовались зависимостью 50-ти процентной обеспеченности

$$\overline{Q_z} = Q_{z50\%} = 2 \cdot 10^{-7} [u_*^2 / (g \cdot x_0)]^2, \quad (14)$$

определив общий расход массы частиц, можно рассчитать переносимую ветром массу за бурю через фронт переноса шириной один метр

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

Ввиду отсутствия непрерывного математического описания функции общего расхода песка во время бури, будем определять перемещаемую массу песка за бурю  $M$  длительностью  $\tau$  не интегрированием по времени непрерывной функции  $Q_z(t)$ , а рассчитывать за дискретные интервалы времени. Длительность продолжительной бури  $\tau$  можно представить в виде суммы временных интервалов  $\tau = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ , где  $n$  – число интервалов времени  $\Delta t_i$  в течение которых  $u_*$  может быть принята постоянной величиной. Тогда перенесенную за бурю массу песка можно рассчитать по формуле

$$M = \sum_{i=1}^n Q_{zi} \cdot \Delta t_i, \quad (15)$$

где  $Q_{zi}$  – общий расход песка в  $i$ -й интервал времени. Для вычислений мы воспользовались средней из трех кривых изменения  $u_*$  во время бури 6...7 мая на рис. 11, представив её в виде гистограммы. Результаты расчетов приведены ниже

Размер частиц $x_0$ , мкм	Вынесенная масса частиц из источника через фронт переноса один км, тыс. т·км <sup>-1</sup>	Вынесенная масса частиц из источника через фронт переноса 200 км, млн. т
35	81,86	16,372
50	40,11	8,022

Полученные массы выноса алевритового аэрозоля только за одну длительную сильную бурю поражают своими масштабами. Они намного превышают массы выноса песчано-солевого аэрозоля во время песчаных бурь, наблюдавшимися в 70-е годы прошлого столетия.

В монографии [6] приведены оценки переноса масс песка для наиболее сильной песчаной бури в изучаемом регионе, которая была 21...22 апреля 1974 г. На М Аральское Море она продолжалась 31,1 ч при скорости ветра 12...24 м/с. За это время воздушный поток перенес до 100 тыс. т/км песка с максимальным общим расходом 6 кг/(м·с). Фронт переноса этой бури неизвестен, поэтому вся масса вынесенных частиц не определена. На станциях Баян и Уялы эта буря наблюдалась лишь 21 апреля. Максимальный общий расход здесь достигал меньших значений – 1 и 1,5 кг/(м·с) соответственно. В районе М Баян масса песка, перенесенного ветром за эту бурю, могла достичь 9200 т/км, на М Уялы – 19000 т/км. Эти уменьшенные расходы массы песка указывают на значительно меньший масштаб интенсивного фронта переноса. На всех трех станциях был отмечен перенос песка в направлении на северо-восток, что указывает на близость синоптической ситуации к рассмотренной нами бури. Пыльные бури такого масштаба и интенсивности – сравнительно редкое явление в этом регионе.

Оценки для пылевых выносов массы аэрозоля, зафиксированных над Аральским морем 22 мая 1975 г. с ИСЗ «Метеор-18» и 6 мая 1979 г. с ИСЗ «Метеор-29» были сделаны Григорьевым и Липатовым [7]. Горизонтальные размеры пылевых образований определялись по ТВ изображениям. Полученная авторами масса пыли в столбе атмосферы основанием в 1 км<sup>2</sup> составила 27 мая около 20 т, а 6 мая – около 60 т. Общая масса этих пылевых образований в момент их обнаружения со спутников достигала соответственно 240 тыс. т и 1,5 млн. т. Сравнение показывает, что масса

выноса с алевритовых отложений во время пыле-солевой бури 6...7 мая 2007 г. превышала их в 5...10 раз.

### Заключение

Эоловые процессы являются результатом взаимодействия воздушных потоков с подстилающей поверхностью. Поэтому песчаные и пыльные бури являются функцией большого числа параметров, которые можно разделить на две группы, характеризующие, соответственно, состояние приземного слоя атмосферы и поверхностного слоя грунта. Это диктует необходимость изучения дисперсного и солевого состава донных отложений, создания математической модели источника выноса ветром солевого и пылевого аэрозоля во время бурь, моделей строения пограничного слоя атмосферы и взаимодействия ветропесчаного потока, набегающего на алевритовые поверхности. Проведение метеорологических измерений во время пыле-солевых бурь на новых осушенных территориях дна Арала с участием человека маловероятно, поэтому следует предусмотреть установку автоматических станций в источнике бурь. Необходимо проведение экспедиционных исследований дисперсного состава алевритов в виду неопределенности полученных нами результатов вычислений при априорном задании функции распределений частиц по размерам источника выноса аэрозоля. Как видим, перед исследователями стоят очень сложные задачи, для решения которых потребуется значительное время и вложение больших инвестиций в проекты научных исследований.

Действие в этом регионе источника выноса аэрозолей не только от песчано-солевых, но и от значительно более мощного – пыле-солевых бурь, приносящих мелкодисперсные частицы на окружающие территории, оказывает и будет в дальнейшем оказывать негативное воздействие на здоровье людей, природу, технику и хозяйственную деятельность. Дальность выноса этих более мелких частиц значительно увеличилась и достигает 600...800 км. Значительно возросла и выносимая масса частиц твердой фазы во время бурь – не менее чем на один – два порядка значения величины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы гидрометеорологии озера Балхаш и Прибалхашья / Под ред. И.И. Скоцеляса – СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. – 270 с.
2. Ахлестина Е.Ф., Малышев В.В., Иванов А.В. Нефтегазаносная терригенная формация палеогена юго-востока Русской плиты // Геология нефти и газа. – 2001. – № 4. – 9 с.



3. Баренблатт Г.И., Голицын Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 44 с.
4. Бродская Н.Г. Осадкообразование в озерах засушливой зоны СССР. Аральское озеро-море // В кн. Образование осадков в современных водоемах – М.: Изд-во АН СССР.– 1954. – С. 237-282.
5. Волеваха В.А., Бабенко В.И., Ганюгина Н.Ф. О состоянии нижней тропосферы во время сильных пыльных бурь на Украине // Тр. УкрНИГМИ. – 1977. – Вып. 160. – С. 47-58.
6. Гидрометеорологические проблемы Приаралья. / Под ред. Г.Н. Чичасова. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 276 с.
7. Григорьев А.А., Липатов В.Б. Распространение пылевых загрязнений в Приаралье по наблюдениям из космоса // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1983. – № 4. – С. 73-77
8. Кравцова В.И. Деградация 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.
9. Орлова М.А. Роль эолового фактора в солевом режиме территорий. – Алма-Ата: изд-во «Наука КазССР», 1983. – 230 с.
10. Петренко Н.В. О влиянии меридиональных горных хребтов на эволюцию циклонов. // Труды ЦИП. – 1948.– Вып. 7(34). – С. 88-160.
11. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. – Л.: Гидрометиздат, 1986. – 702 с.
12. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть II. – Л.: Гидрометиздат, 1965. – 492 с.
13. Семенов О.Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. – Алматы: 2011. – 580 с.
14. 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.
15. Синоптические процессы Средней Азии / В.А. Бугаев и др. – Ташкент: Изд. АН Узбекской ССР. – 1957. – 464 с.
16. Чередниченко А.В. Синоптическая ситуация, предшествующая пыльной буре 7 мая 2007 г. в районе Аральского моря. // Гидрометеорология и экология. – 2012. – № 1 – С. 41-57.
17. Экономическая оценка локальных и совместных мер по сокращению социально-экономического ущерба в зоне Приаралья. / Проект INTAS – Арал – 2000 – 1059. – Отчет, 2004. – 153 с.

18. Barenblatt G.I., Golitsyn G.S. Local structure of Matyre Dust Storms // J. of the Atmospheric Sciences. – 1974. – Vol. 31. – № 7.– P. 1917-1933.
19. 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.
20. 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.

Поступила 24.04.2012

	И.В. Каипов
Физ.-мат. ғылымд. канд.	О.Е. Семенов
Геогр. ғылымд. докторы	А.В. Чередниченко
	А.П. Шапов

**ҚҰРҒАҒАН ҮЛКЕН АРАЛ ТҮБІНІҢ АЛЕВРИТТІК  
БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ШЫҒАРЫЛУ САЛМАҒЫН ҚАШЫҚТЫҚТАҒЫ  
СПУТНИКТІК БАРЛАУ ЖӘНЕ ҮЛКЕН МАШТАБТЫ  
ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ МОДЕЛІ МӘЛІМЕТТЕРІМЕН БАҒАЛАУ**

*Үлкен Аралдың құрғаған бөлігі түбінің алевриттік бөлшектерінің шығарылу салмағын космостық мәліметтерді қолдану арқылы кешенді бағалау әдістемесі жасалды. Құрғаған жерлердегі метеостанциялардың жоқтығын үлкен масштабты гидродинамикалық WRF моделі бойынша қысым алаңдарын, жел жылдамдығын және динамикалық жылдамдықты есептеу арқылы толтырылды. Алевриттік бөлшектердің априори өлшемдері бойынша үлестірілімі орташа геометриялық өлшеммен логарифмдік орташа функциясында берілген: есептеудің бірінші түрі –  $x_0 = 50$  мкм,  $\sigma_{\lg x} = 0,23$  және екінші түрі үшін  $x_0 = 35$  мкм,  $\sigma_{\lg x} = 0,27$ . 2007 жылдың 7 мамырындағы күшті дауыл үшін 170 м биіктіктегі жер бетіндегі атмосфера қабатындағы қатты ағынның тік профилі, осы қабаттағы және атмосфераның шекаралық қабатындағы салмақтың жалпы ағымы есептелді. Дауылдан шығарылған аэрозол салмағы тиесілі бөлшек өлшемдері үшін 8 және 19,4 млн. т жетті.*