

УДК 551.515.3 (262.83)

ВЕТРОВОЙ ПЕРЕНОС ПЕСКА В ПРИАРАЛЬЕ

О.С. Галаева

Канд. физ.-мат. наук О.Е. Семенов

Для семи метеостанций казахстанского Приаралья (Аральское Море, Кызылорда, Джусалы, Казалинск, Карак, Чирик-Рабат, Уялы) за период 1966...2005 гг. рассчитаны скалярные и векторные величины, переносимых ветром во время дефляционных процессов масс песка. Полученные результаты позволили оценить ситуацию после двадцатипятилетнего интенсивного падения уровня моря. На трех станциях (Аральское Море, Кызылорда, Джусалы) после длительного снижения интенсивности переноса масс песка в конце 90-х – начале 2000-х гг. вновь отмечено их значительное увеличение.

Для расчета массы песка, переносимой ветром в приземном слое атмосферы во время пыльных бурь, в начале 80-х годов О.Е. Семеновым была создана модель, позволяющая получать скалярные и векторные оценки объемов переноса песка. В качестве исходной информации в ней использовались скорость и направление ветра, наблюдаемые на метеостанциях и данные о среднем геометрическом размере частиц песка в исследуемом районе. По ней можно рассчитывать средние многолетние годовые массы песка, переносимые в приземном слое через фронт шириной в один км и высотой 10 м. Это позволяет объективно оценивать развитие дефляционных процессов, их опасность в изучаемых географических районах. По этой модели впервые количественно и детально оценена интенсивность дефляции в регионе Аральского моря [1, 2].

С появлением современной вычислительной техники стало возможно полностью автоматизировать расчеты скалярных и векторных характеристик переноса масс песка. По описанной выше модели С.К. Волковой и А.П. Шаповым была разработана программа «PESOK», которая позволяет осуществлять расчеты характеристик переноса, а так же архивацию, корректировку и пополнение базы данных.

Первые такие исследования были выполнены в середине 80-х годов 20 века для песчано-солевых бурь на осушенном дне Арала и Приаральского региона [3]. В начале 21 века ряды наблюдений удлиннили до

2005 г. включительно. Для расчетов использовали семь станций казахстанского Приаралья: Аральское Море, Кызылорда, Джусалы, Казалинск, Карак, Чирик-Рабат, Уялы. Для этих станций по модели были рассчитаны скалярные и векторные величины масс переносимого ветром песка за год во время пыльных бурь (ПБ) и пыльных поземков (ПП). В табл. 1 приведены основные статистики этих рядов: средние многолетние годовые расходы песка (M , $\text{т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$), их стандартные отклонения (σ), коэффициент вариации (C_v).

Таблица 1

Основные статистические параметры рядов переноса песка по станциям Аральского региона: M ($\text{т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) – средняя многолетняя масса песка, σ ($\text{т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) – среднее квадратическое отклонение, C_v – коэффициент вариации

Станция	Пыльная буря			Пыльный поземок			ПБ+ПП		
	M	σ	C_v	M	σ	C_v	M	σ	C_v
Аральское Море	6619	2764	0,42	1034	1097	1,06	7653	3486	0,46
Уялы	3256	3630	1,00	2708	3645	1,35	5961	6313	1,06
Казалинск	1263	188	1,49	290	409	1,41	428	577	1,35
Кызылорда	986	703	0,72	959	720	0,75	194	1238	0,64
Джусалы	4272	5846	1,37	48	84	1,75	4344	5880	1,35
Чирик-Рабат	722	871	1,21	2	3	1,8	724	873	1,21
Карак	1009	1257	1,25	2	3	1,95	1011	1257	1,24

На станции Аральское Море средняя многолетняя масса песка, переносимого обоими явлениями, равна $7653 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Это значение близко к величине средней многолетней массы на метеостанции Уялы. Однако величина среднего квадратического отклонения на М Уялы почти в 2 раза больше, чем на метеостанции Аральское Море, поэтому коэффициент вариации на метеостанции Аральское Море равен 0,46, а на метеостанции Уялы – 1,06. Основной вклад в перемещение песка на метеостанции Аральское Море вносят пыльные бури. Ими переносится 86 % от средней многолетней массы и только 14 % – пыльными поземками. На метеостанции Уялы пыльными бурями переносится $3255,6 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, что составляет 55 % от средней многолетней массы ($5961,2 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) и $2708,2 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ – пыльными поземками (45 %).

На метеостанции Казалинск среднее многолетнее значение массы составляет $428 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Пыльными поземками здесь переносится в два с лишнем раза больше песка, чем бурями. Коэффициент вариации одина-

ково высок для обоих рядов явлений и достигает значений – 1,49 для бурь и 1,41 – для поземков.

На метеостанции Кызылорда средняя многолетняя масса песка обоих явлений достигает $1940 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. При этом пыльными поземками здесь переносится $959 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, а бурями $982 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Коэффициент вариации равен 0,64. Такой же порядка величины коэффициент вариации на станции Аральское Море, на всех остальных станциях он значительно выше.

На станции Чирик-Рабат практически вся масса песка переносится во время пыльных бурь и равна $722 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, пыльными поземками перемещается всего лишь $1,8 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Коэффициент вариации этого ряда составляет 1,2. На станции Карак и Джусалы, так же как и на станции Чирик-Рабат, перенос песка осуществляется в основном пыльными бурями. Среднее многолетнее значение массы песка пыльных бурь на метеостанции Карак составляет $1009 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, пыльных поземков – $1,5 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. В районе станции Джусалы пыльными бурями переносится $4272,5 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, пыльными поземками – $48 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. На станции Карак для ряда масс пыльных поземков получен самый высокий коэффициент вариации из всех станций, равный 1,95.

Из всех рассматриваемых станций только на метеостанции Казалинск средняя многолетняя масса песка, переносимого пыльными поземками, больше, чем пыльными бурями. На метеостанциях Кызылорда и Уялы величина средней многолетней массы песка, переносимого пыльными бурями и поземкам близка. На остальных же станциях основная масса песка переносится пыльными бурями.

Рассмотрим далее изменчивость интенсивности дефляционных процессов во времени. На рис. 1...7 приведен многолетний ход масс песка на метеостанциях, переносимого обоими явлениями, а так же сглаженная полиномами кривая. На рис. 1 показан многолетний ход для метеостанции Аральское Море.

Здесь мы видим три пика, один из которых наблюдался в 1970 г. и составил $21385 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, второй в 1984 г. – $14635 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ и третий в 2002 г. – $13657 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Если рассматривать в целом 40-летний ряд, то видно, что в последнее десятилетие, начиная с 2000 г. наблюдается увеличение массы переносимого песка.

На рис. 2 представлены данные метеостанции Уялы, где максимальный перенос песка был в 1984 г. и составил $57472 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, что в два раза с лишним выше максимального значения на метеостанции

Аральское Море. В сорокалетнем разрезе мы видим, что с 80-х годов прошлого столетия произошло устойчивое уменьшение переноса песка. Ранее мы получили, что метеорологические ряды на этой станции имеют наибольшую неоднородность в результате неоднократного перенесения наблюдательной площадки. С 1994 г., в результате плохого финансирования, наблюдения на станции велись по сокращенной программе и представляемые в этот период данные, скорее всего, не достоверны.

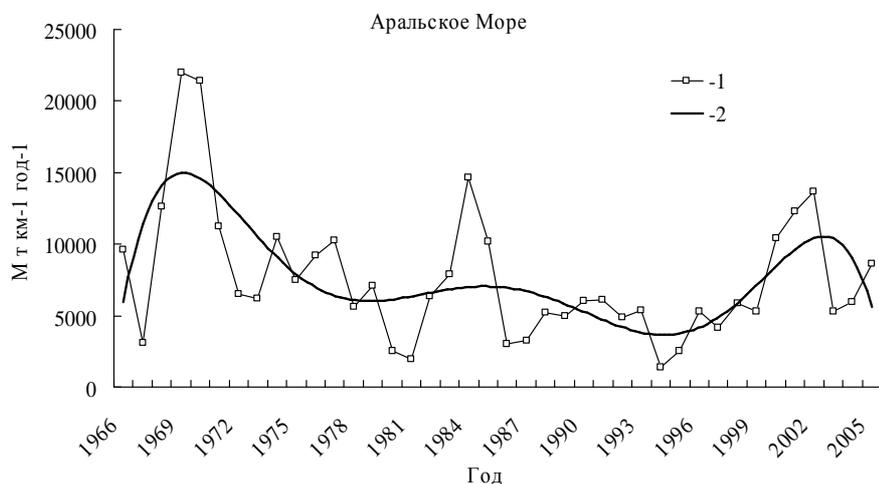


Рис. 1. Многолетний ход массы песка, переносимого пыльными бурями и поземками (1) и сглаженная кривая (2) на метеостанции Аральское Море.

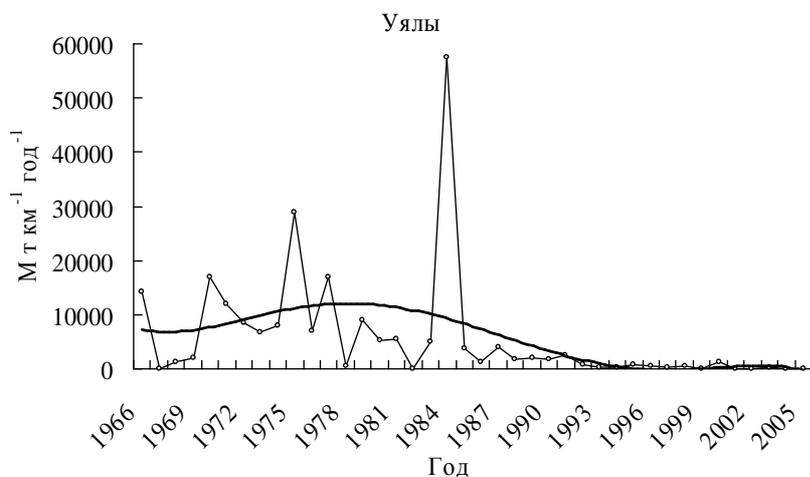


Рис. 2. Многолетний ход массы песка, переносимого пыльными бурями и поземками и сглаженная кривая на метеостанции Уялы.

На рис. 3 показан многолетний ход масс песка для метеостанции Казалинск. Здесь, начиная с 1966 г., наблюдается стойкая тенденция к уменьшению переноса, а с 1985 года сглаженная кривая стремится к нулю. Положительную роль в прекращение здесь песчаных бурь сыграл ввод в эксплуатацию Казалинского массива орошаемых земель. А так же необходимо учитывать, что сегодня станция находится на южной окраине города в окружении жилых массивов. Местность закрытая.

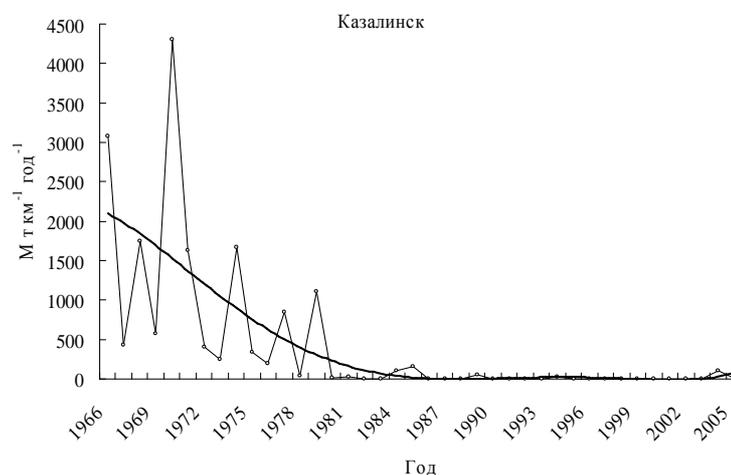


Рис. 3. Многолетний ход массы песка, переносимого пыльными бурями и поземками и сглаженная кривая на метеостанции Казалинск.

На метеостанции Кызылорда (рис. 4) кривая многолетнего хода масс имеет пилообразную форму, но по сглаженной кривой можно судить, об устойчивом уменьшении ветрового переноса начиная с 1966 года.

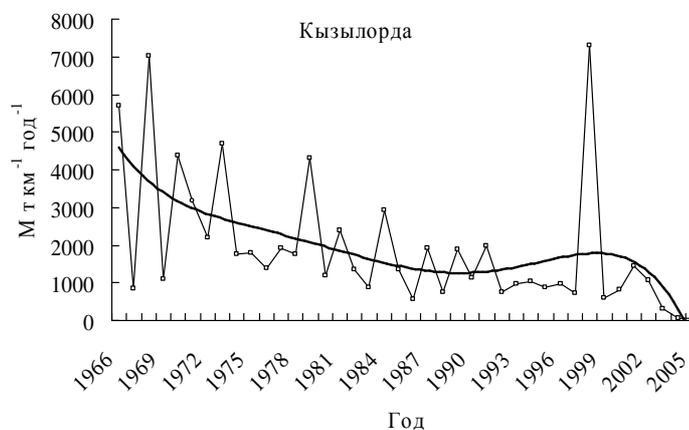


Рис. 4. Многолетний ход массы песка, переносимого пыльными бурями и поземками и сглаженная кривая на метеостанции Кызылорда.

Уменьшение величин переносимых масс также наблюдается и на метеостанциях Чирик-Рабат (рис. 5), Карак (рис. 6) и Джусалы (рис. 7). Максимальная масса песка на метеостанции Чирик-Рабат была перемещена в начале периода наблюдений в 1968 г. и составила $5847 \text{ т} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Аналогичный многолетний ход прослеживается и на метеостанции Карак, где максимум достиг в 1966 г. – $10039 \text{ т} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

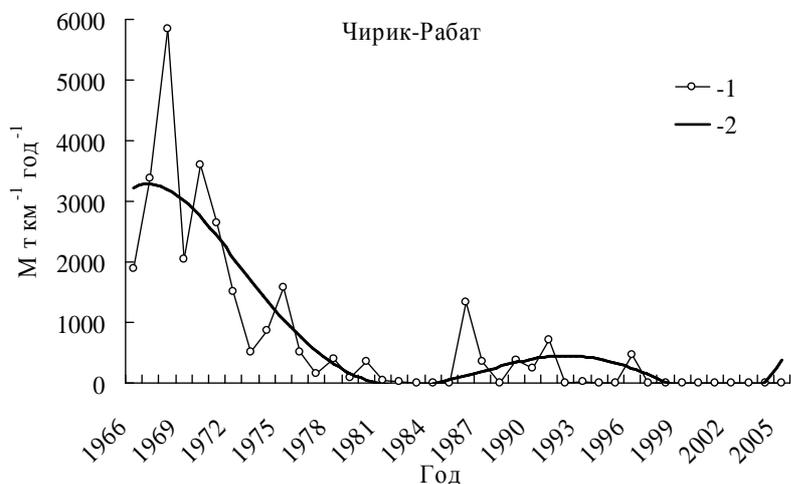


Рис. 5. Многолетний ход массы песка, переносимого пыльными бурями и поземками и сглаженная кривая на метеостанции Чирик-Рабат.

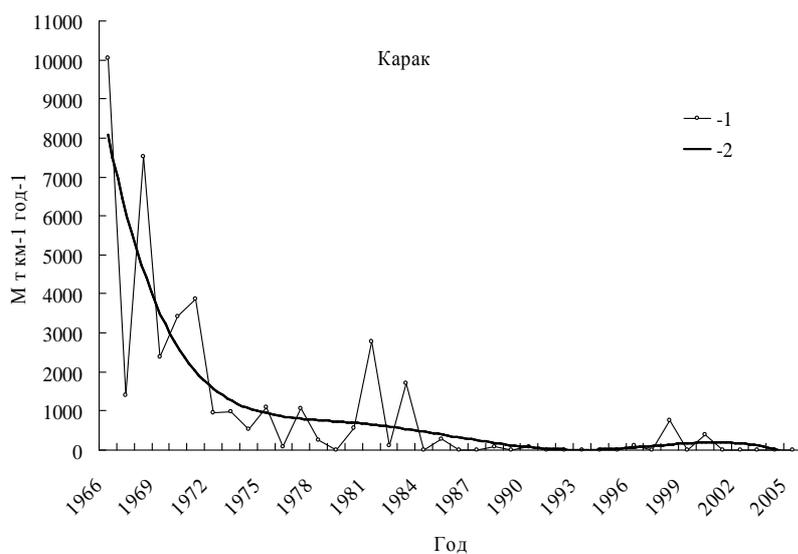


Рис. 6. Многолетний ход массы песка, переносимого пыльными бурями и поземками и сглаженная кривая на метеостанции Карак.

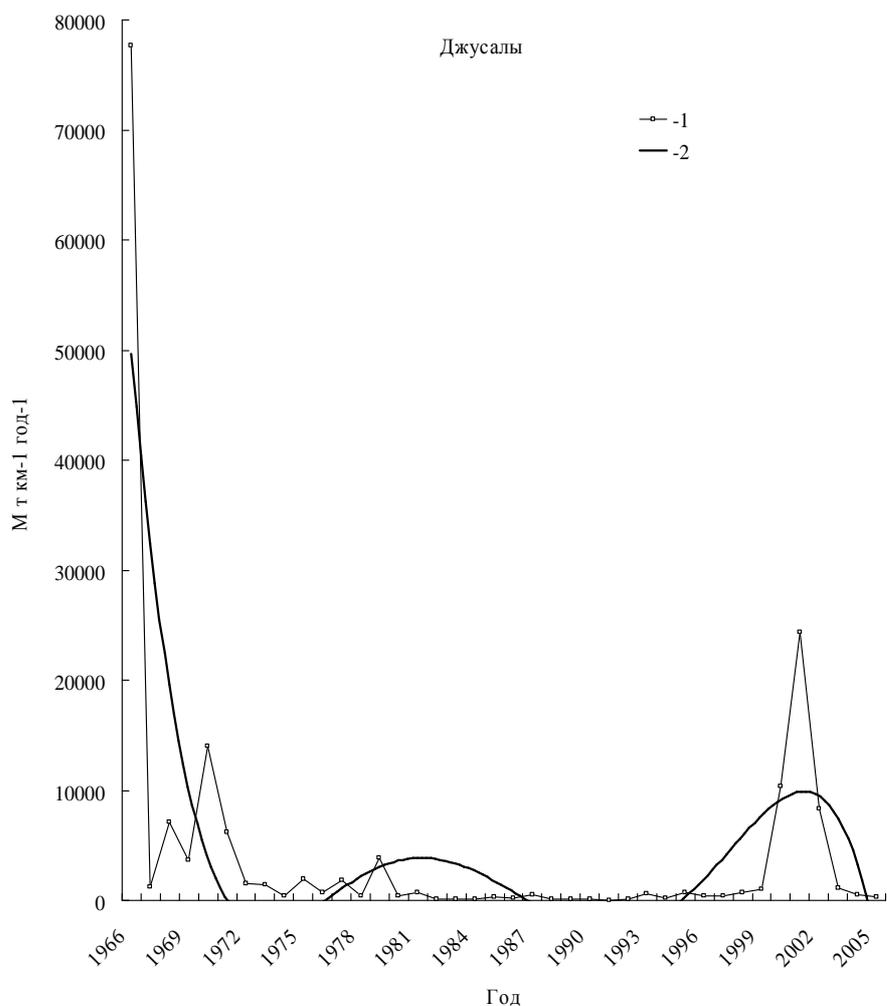


Рис. 7. Многолетний ход массы песка, переносимого пыльными бурями и поземками и сглаженная кривая на метеостанции Джусалы.

Ряд станций, таких как Аральское Море, Джусалы и Чирик-Рабат, имеют по три хорошо выраженных максимума и минимума. Особенно хорошо совпадает первый максимум, который был в период 1966...1970 гг., второй максимум наблюдался на метеостанциях Аральское Море и Чирик-Рабат он был 1984...1986 гг., третий максимум был на метеостанциях Аральское Море и Джусалы в период 2000...2002 гг. В 1999 г. значительное усиление переноса массы песка было отмечено на М Кызылорда, где был превышен максимум конца 60-х годов – 7500 т/(км год). При решении задач по перемещению песков ветром и изучении влияния бурь на окружающие территории ветропесчаные потоки следует рассматривать как

векторные величины, так как наряду с массой они имеют и направление в пространстве. Основными векторными характеристиками дефляции песков являются годовая роза векторов, представляющая собой суммы масс песка, переносимых за год в направлениях каждого из 16 румбов (Рис. 8), и годовой результирующий вектор (Рис. 9), показывающий конечное направление передвижения эоловых форм рельефа в результате многочисленных случайных перемещений в пространстве и во времени. Средняя многолетняя роза векторов исключительно важна при оценке выноса песка за границы контуров изучаемого песчаного массива и для разработки проектов противодефляционных мероприятий. Средний многолетний результирующий вектор может служить для прогноза направления перемещения массива подвижных песков или отдельных форм песчаного рельефа.

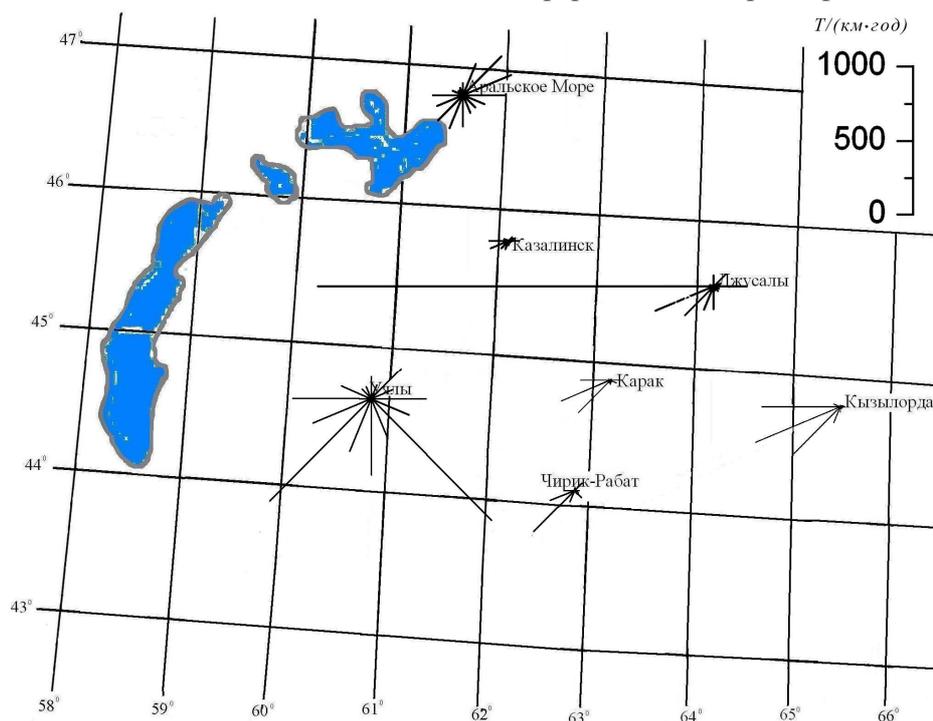


Рис. 8. Многолетние средние годовые розы векторов переноса массы песка ветром в Приаралье.

В табл. 2 приведены средние многолетние объемы переноса для Приаральского региона. Представленные величины являются суммарными для пыльных бурь и поземков. На рис. 9 приведены средние многолетние годовые результирующие векторы переноса для этих же станций. Представленные величины так же являются суммарными для пыльных бурь и поземков.

Таблица 2
Средние многолетние суммарные для пыльных бурь и поземков объемы переноса в Приаральском регионе, т·км⁻¹·год⁻¹

Метеостанция	Направление, град															
	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
Аральское Море	78	221	359	344	273	152	115	125	206	235	232	184	199	75	42	51
Казалинск	3	5	22	30	45	12	7	3	19	40	46	86	86	22	2	1
Джусалы	74	7	116	53	226	38	43	31	154	170	274	428	2684	27	7	13
Карак	4	0	12	6	82	44	8	6	26	19	303	359	201	14	7	0
Чирик-Рабат	0	18	71	9	30	21	61	7	10	80	377	171	69	7	2	0
Уялы	146	98	283	154	370	276	1143	289	510	382	967	422	529	216	87	89
Кзылорда	10	10	11	23	31	10	13	9	36	116	446	629	537	49	8	2

В табл. 2 хорошо видны различия в выносе твердой фазы на северных и южных станциях Восточного Приаралья. На метеостанции Аральское Море преобладает перенос в направлении восточных, северо-восточных румбов. На остальных станциях, расположенных южнее Аральска превалирует перенос в направлениях от западного до юго-западного. Условная граница этих зон может быть определена по 46° с.ш. Кроме того, обращает на себя внимание более интенсивный перенос в юго-восточном направлении на метеостанции Уялы.

На метеостанции Аральское Море максимальный перенос наблюдается в направлениях северо-восточной и юго-западной четвертей – 359 т·км⁻¹·год⁻¹ на северо-восток и 232 т·км⁻¹·год⁻¹ на юго-запад. В других направлениях перенос значительно меньше. Минимальный модуль имеет северо-западный вектор и равен 42 т·км⁻¹·год⁻¹.

На метеостанциях Казалинск, Джусалы, Кызылорда, Карак и Чирик-Рабат преобладает перенос в направлениях юго-западной четверти. Метеостанции Карак и Чирик-Рабат расположены в регионе, где антропогенное влияние на процессы генерации пыли минимально, незначительно так же здесь и влияние выносов из районов осушки дна Аральского моря. Поэтому с высокой степенью достоверности данные о переносе по этим станциям можно считать фоновыми.

При рассмотрении тенденции климатического хода процессов на метеостанции Карак векторы румбов с максимальным переносом имеют следующие значения: ЗЮЗ – 359 т·км⁻¹·год⁻¹, ЮЗ – 303 т·км⁻¹·год⁻¹, З – 201 т·км⁻¹·год⁻¹. Метеостанция Чирик-Рабат – самая южная из рассматриваемых станций. На ней выделяется один хорошо выраженный вектор юго-западного направления – 377 т·км⁻¹·год⁻¹ и ближний ЗЮЗ – 171 т·км⁻¹·год⁻¹, по остальным направлениям перенос очень слабый. На станции Кызылорда роза векторов аналогична розе векторов станции Карак, но модули векторов несколько больше. Максимальный перенос наблюдается в ЗЮЗ направлении и равен 629 т·км⁻¹·год⁻¹, на ЮЗ переносится 446 т·км⁻¹·год⁻¹, на З – 537 т·км⁻¹·год⁻¹.

Для станции Джусалы характерно подавляющее преобладание переноса в западном направлении – модуль этого вектора равен 2684 т·км⁻¹·год⁻¹ и существенно превосходит значения векторов других румбов. Станция Казалинск находится в районе закрепленных растительностью песков, поэтому здесь получены самые низкие максимальные значения его ветрового переноса. Максимальный перенос массы песка здесь наблюдается в З и ЗЮЗ направлениях и составляют 86 т·км⁻¹·год⁻¹.

На метеостанции Уялы максимальные модули имеют юго-восточный ($1143 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) и юго-западный ($967 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) векторы. Отличительной особенностью переноса в районе этой станции является большая величина юго-восточного вектора. Значительная доля его обусловлена очень интенсивной пыльной бурей 15...17 июня 1984 года. Тогда в юго-восточном направлении было перенесено $29000 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, что составляет 57 % от среднего многолетнего модуля вектора.

Подводя итог рассмотрению средних многолетних роз векторов переноса песка в Приаралье, можно сделать вывод, что большинство станций этого региона имеет максимальные значения модуля в направлениях юго-западной четверти и лишь некоторые станции имеют максимальные значения векторов, направленные на юго-восток, восток и северо-восток.

Средние многолетние результирующие векторы переноса песка (рис. 9) включают значения, полученные как для пыльных бурь, так и для пыльных поземков и показывают, в каком направлении идет перемещение подвижных песков за рассматриваемый период времени. Анализируя рис. 9, можно констатировать, что станция Аральское Море, расположенная на севере, имеет средний многолетний результирующий вектор, близкий к восточному румбу, а именно – 108° , при модуле $481 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$.

Следует отметить, что на станции Аральское Море направление результирующего вектора не совпадает с направлениями максимального переноса, так как наибольшие векторы северо-восточной и юго-западной четверти, практически, при сложении полностью компенсируют друг друга. Пять станций рассматриваемого региона имеют направление многолетнего результирующего вектора, близкое к западно-юго-западному румбу: Казалинск – 235° , Джусалы – 260° , Карак – 237° , Чирик-Рабат – 223° , Кызылорда – 245° . Как видим, эти направления значительно отличаются от направления в Аральске. Возможно, это связано с определенными синоптическими процессами, происходящими в этом регионе.

Детально остановимся на полученных результатах каждой станции. Самый большой средний многолетний результирующий вектор наблюдается на метеостанции Джусалы, его величина равна $2982 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, при направлении переноса 260° . Второй по величине вектор имеет метеостанция Уялы (183° и $2174 \text{ т}\cdot\text{км}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$). Данные станций хорошо отражают картину дефляционных процессов, происходящую в районах, где они расположены. Это новые обширные, песчаные массивы, образовавшиеся в ходе падения уровня моря и осушки значительных площадей, подверженные выветриванию.

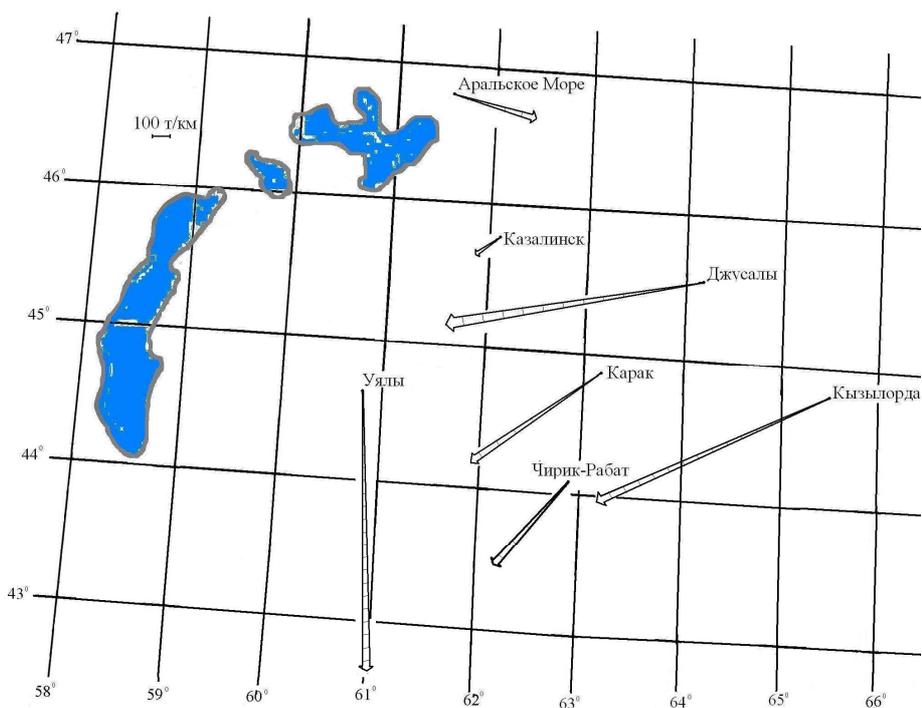


Рис. 9. Многолетние средние годовые результирующие векторы переноса песка ветром в Приаралье.

К станциям, на которых ветром перемещаются несколько меньшие массы песка, относятся Кызылорда, модуль вектора которой равен $1587 \text{ т} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ при направлении 245° . На метеостанции Карак модуль равен $742 \text{ т} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ при направлении результирующего вектора 238° .

На метеостанции Чирик-Рабат величина модуля равна $545 \text{ т} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ при направлении 223° . Эта масса сопоставима с модулем вектора метеостанции Аральское Море.

Метеостанция Казалинск имеет наименьший модуль вектора из всех сети станций, он равен $156 \text{ т} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ при направлении 235° . Его величина в пятнадцать раз меньше максимальных значений в этом регионе.

Таким образом, выполненные исследования направления переноса песка позволяют сделать вывод, что перемещение подвижных песков севернее 46° параллели идет в восточном направлении. Движение песков, расположенных южнее этой параллели, наблюдается на востоке региона в западном направлении, исключение составляет станция Уялы, где перенос идет в южном направлении.

Работа выполнена при поддержке Комиссии Европейского Союза, контракт №516721 (INCO) – CALTER.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

10. Гидрометеорологические проблемы Приаралья. / Под ред. Г.Н. Чичасова. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 276 с.
11. Галаева О.С., Семенов О.Е. О мониторинге выноса песчано-солевого аэрозоля с осушенной части дна Аральского моря // Гидрометеорология и экология. – 1997. – № 2. – С. 116 – 121.
12. Галаева О.С., Семенов О.Е., Шапов А.П. Об особенностях ветрового переноса песка в Аральском регионе // Гидрометеорология и экология. – 1996. – № 4. – С. 73 – 93.

Казгидромет, г. Алматы

Казахский научно-исследовательский институт экологии и климата, г. Алматы

АРАЛ МАҢЫНДАҒЫ ҚҰМНЫҢ ЖЕЛМЕН КӨШУІ

О.С. Галаева

Физ.-мат. ғылымд. канд. О.Е. Семенов

Арал маңындағы қазақстандық жеті метеостанция үшін (Арал теңізі, Қызылорда, Жусалы, Қазалы, Қарақ, Чирик-Рабат, Ұялы) 1966...2005 жылдар арасындағы мерзімге дефляциялық процесс кезіндегі желмен көшілетін құм салмағының скалярлі және векторлық көрсеткіштері есептелінген. Алынған нәтижелер теңіз деңгейінің қарқынды төмендеуінің жиырма бес жылдан кейінгі жағдайын бағалауға мүмкіндік береді. Құм салмағының қарқынды көшуінің ұзақ уақыт төмендеуінен кейін үш станцияда (Арал теңізі, Қызылорда, Жусалы) 90 жылдың аяғы мен 2000 жылдар басында қайта ұлғаюы байқалды.