

Моделирование выноса солей с обсохшего дна Аральского моря и его последствий

Тлеумуратова Бибигуль Сарыбаевна

НИИ естественных наук Каракалпакского отделения АН Республики Узбекистан

Мамбетуллаева Светлана Мирзамуратовна;

Мустафаева Рахима

Каракалпакский государственный университет им. Бердаха

Масштабный вынос солей с постаквальной суши Аральского моря является одним из самых опасных экологических процессов в Приаралье. Ядовитый солевой аэрозоль, состоящий в основном из сульфатов и хлоридов, активно воздействует на климат, способствует засолению почв, вызывает заболевания дыхательных путей, глаз, печени, повышает кровяное давление. В связи с этим чрезвычайно актуально изучение как динамики пространственного распределения солепереноса, так и различных аспектов его воздействия на окружающую среду.

Солеперенос представляет собой сложное явление, зависящее от многих, преимущественно метеорологических, параметров. Процесс ветрового выноса солей может рассматриваться как частный случай гидродинамики полифазных потоков, наименее разработанной части общей гидродинамики. Анализ исследований атмосферного переноса солей в Приаралье позволяет считать данный процесс недостаточно исследованным. Например, не существует единого мнения о механизме отрыва частиц от поверхности земли, о структуре и динамике поля загрязнения во время и после пылевой бури.

Еще менее изучены такие последствия солепереноса в Южном Приаралье, как увеличение числа заболеваний

органов дыхания, рост континентальности и засушливости климата, засоление почв. Надо отметить, что в исследованиях по данной тематике, носящих преимущественно качественный характер, редко используются методы математического моделирования.

Нами предпринята попытка восполнить некоторые пробелы в вопросах исследования выноса солей с обсохшего дна Аральского моря и его последствий. В данной работе представлены результаты моделирования выноса солей и корреляционного анализа связи и динамики заболеваний органов дыхания с этим явлением.

Моделирование выноса солей. Базисом для грандиозного по масштабам процесса выноса солей (рис.1) являются солончаковые процессы на обсохшем дне Аральского моря. Поэтому исследование годовой и многолетней динамики засоленности постаквальной суши является необходимым этапом в изучении выноса солей. С учетом этого разработанная нами математическая модель [1] содержит наряду с другими блок динамики соленакопления на постаквальной суши. Выходные данные этого блока используются для дальнейших расчетов поля концентрации солей в расчетной области.

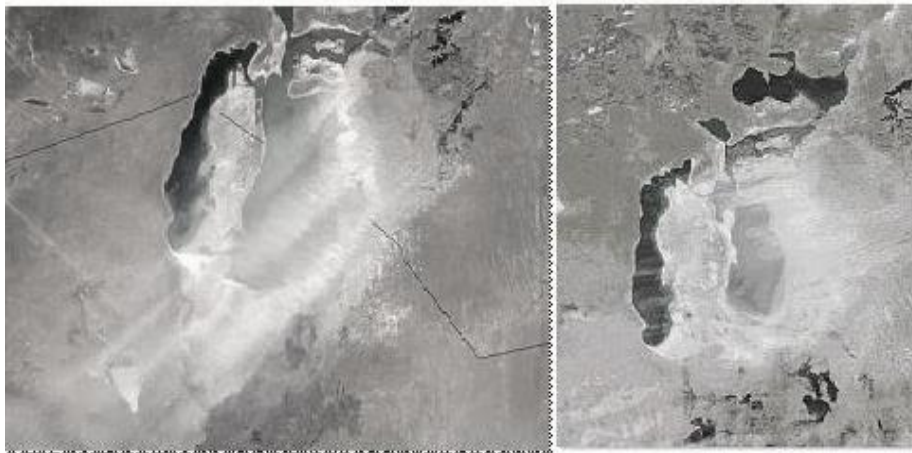


Рис. 1. Ветровой вынос солей 15 марта 2002 г. и 10 апреля 2008г. синтезированное (1-3-ий каналы) изображение со спутника NOAA

Модельные расчеты проводились для периода 1965-2013гг. Расчетная область по высоте ограничена уровнями -3м и 5км, а в плане – границей Республики Каракалпакстан, 58° и 62° в.д.

Блоки расчета динамики соленакопления на постаквальной суши и концентрации солей в атмосфере представляют собой системы дифференциальных уравнений второго порядка. Влияние солепереноса на заболеваемость органов дыхания исследовалось методами корреляционного анализа.

Реальный атмосферный перенос (рис.1) представляет собой совокупность отдельных струй, соответствующих

дискретным источникам выноса (солончакам). Дальность выноса в зависимости от скорости ветра достигает нескольких сотен километров. Поле концентрации солей при ветровом выносе солей весьма динамично и сложно по структуре. Численные эксперименты по модели атмосферной диффузии с вариацией скорости ветра по широкому диапазону (3-25 м/с) показали, что дальний (сотни км) атмосферный перенос солевых частиц происходит при скоростях, превышающих 6-7 м/с.

В процессе ветрового солепереноса можно выделить две составляющие – сальтацию и атмосферный перенос (рис.2).

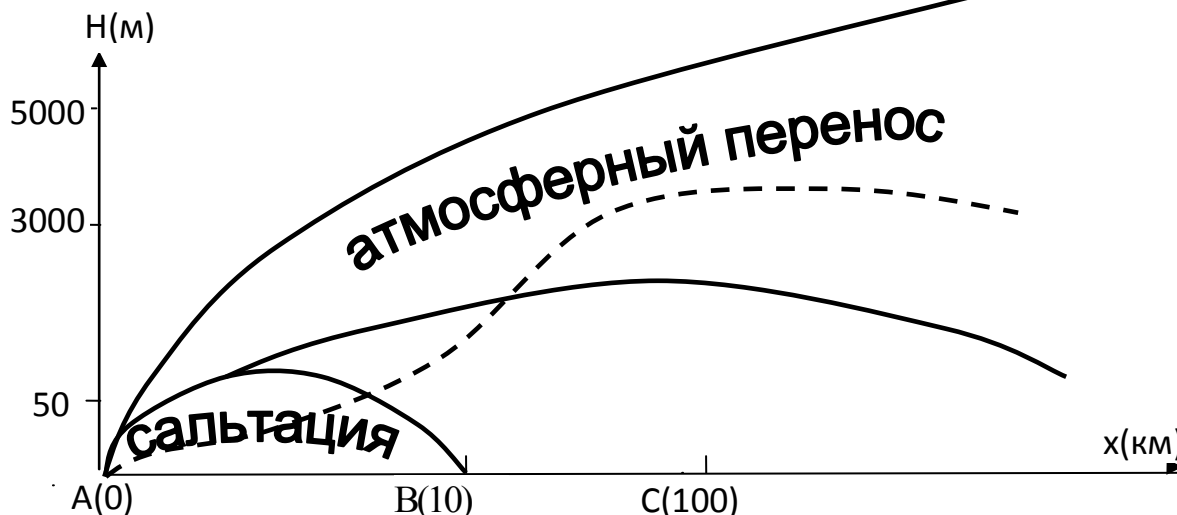


Рис.2. Сепарация аэрозольного потока и траектория максимума концентрации (пунктирная линия)

Сальтационная часть представляет собой сплошную клубящуюся массу тяжелых частиц, передвигающихся скачкообразно под действием отдельных порывов ветра и турбулентности. Высота сальтационной части (отрезок АВ на рис.2) не превышает нескольких десятков метров, а дальность выноса — менее сотни километров.

В атмосферном переносе участвует лишь мелкодисперсная часть солепылевого потока, способная подниматься на большую высоту (до 10 км). Структурно атмосферный перенос представляет собой совокупность отдельных струй, соответствующих дискретным источникам выноса (солончакам). Дальность выноса в зависимости от скорости ветра достигает сотен километров.

Исследование методами математического моделирования многолетней (1966-2013гг.) динамики ветрового выноса

солей с обсохшего дна Аральского моря показало, что основными параметрами солепереноса являются ветровой режим и структура источника. Скорость ветра определяет потенциал выноса, направление — области наибольшего загрязнения. Структура источника гораздо динамичнее ветрового режима и представлена в модели как увеличивающаяся совокупность точечных источников с различной мощностью. Структура источника определяет величину общего выноса с постаквальной суши и расположение локальных минимумов в поле концентрации. Для постаквальной суши характерна высокая эродируемость — от 60 до 620 т/км² для корковых солончаков и от 440 до 2800 т/км² для пухлых солончаков.

В табл.1 представлены полученные нами результаты моделирования выноса солей.

Табл.1. Концентрация солей (мкг/м³) по оси шлейфа выноса (данные модельных расчетов)

Высота (м)	Расстояние от источника выноса солей (м)							
	Сальтация			Атмосферный перенос				
	250	2500	10000	25000	50000	100000	250000	300000
0	13717,42	1371,742	3429355	137,17	68,58	34,29	13,71	11,43
100	45,34719	13156,84	4168349	147,12	71,85	35,33	15,06	12,44
200	0,091209	723,4643	518,1133	154,96	74,49	36,20	16,67	13,62
300	3,14E-05	162,1111	747,0747	161,93	76,76	36,96	18,65	15,04
400	2,1E-09	41,91149	1293,091	168,99	78,80	37,63	21,16	16,79
500		10,49287	931,3272	177,36	80,71	38,22	24,50	19,01
600		2,432197	270,0195	188,96	82,63	38,76	29,17	21,96
700		0,513955	119,4526	207,37	84,70	39,26	36,21	26,05
800		0,098458	59,6749	240,77	87,10	39,73	48,11	32,16
900		0,017072	31,26924	314,38	90,08	40,19	72,66	42,31
1000		0,00268	16,68969	568,40	94,02	40,65	153,5	62,55
1500		6,04E-08	0,682125	42,91	181,91	43,77	29,17	38,28
2000			0,01968	5,48	78,55	52,42	11,63	12,92
2500			0,000371	0,808	13,33	101,45	6,482	7,030
3000			4,54E-06	0,111	3,51	83,44	4,050	4,416
3500				0,013	0,997	16,14	2,666	2,961
4000				0,001	0,282	5,742	1,803	2,053
4500				0,000	0,077	2,355	1,236	1,451
5000				0	0,020	1,014	0,852	1,036

В первые часы ветрового выноса в пределах сальтационной части (≈ 10 км) максимум концентрации находится вблизи поверхности. Концентрация солевых частиц в этой

части аэрозольного потока экспоненциально убывает по мере удаления от источника и с увеличением высоты.

За пределами сальтационной части профиль концен-

трации солей становится инверсионным. Максимум концентрации находится в осевой части шлейфа атмосферного переноса и соответственно меняется высота максимума: на расстоянии 10 км от источника на уровне 400 м, в 100 км максимум находится на высоте 3км, далее начинает снижаться и в 300 км максимум концентрации находится уже на уровне 1 км.

В последующие несколько дней после ветрового выноса солей поле концентрации несколько сглаживается за счет атмосферной диффузии и гравитационного осаждения. При этом инверсия концентрации частиц субмикронного масштаба сохраняется 2-3 недели.

Осадки придают еще большую динамичность полю концентрации путем частичного вымывания и частиц солей из атмосферы. Таким образом, мгновенные поля концентрации полидисперсного аэрозоля сильно варьируют во времени. Поэтому при решении прикладных задач по атмосферному загрязнению производится осреднение за тот или иной период. В данной работе при расчете влияния солепереноса на здоровье местного населения период осреднения равен 1 году.

Определим величины, через которые выражается динамика поля концентрации солей в Южном Приаралье. Назовем *потенциалом выноса солей* (ПВС) произведение мощности источника Q , на продолжительность энергоактивных скоростей ветра T_s (ч/год):

$$P_b = Q T_s \quad (2)$$

т.е. ПВС выражает количество выноса солей в год с единицы площади при данном ветровом режиме. Умножив ПВС на площадь солончаков $S_{ср}$, получим годовой объем выноса со всей постакавальной суши:

$$V = P_b S_{ср} \quad (3)$$

Статистическая обработка полувековой динамики усыхания Аральского моря позволила вывести уравнение регрессии для площади осушенного дна:

$$S_{ср} = 2,5N^2 + 0,5N + 7,5 \quad (4)$$

и площади солончаков:

$$S_{ср} = 0,0042(S_{ср})^2 + 0,073 S_{ср}, \quad (5)$$

где N – номер десятилетия в периоде моделирования 1966-2005гг. ($N=1$ для 1966-1975гг., $N=2$ для 1976-1985гг. и т.д.)

Подстановка (5) в (3) дает аналитическое выражение динамики выноса солей с постакавальной суши Аральского моря.

Возвращаясь к распределению концентрации солей в атмосфере, представим закономерности, выявленные по результатам моделирования процесса солепереноса.

1. С высотой z максимум концентрации удаляется от источника (в линейном приближении, с $R^2=0,923$) по закону:

$$X_{\max} = 56z + 0,42 \quad (6)$$

здесь z – высота уровня (км), X_{\max} – расстояние от источника (км).

2. Профили распределения концентрации по высоте на расстояниях менее 50 км экспоненциальные; для $x > 50$ км профили распределения приближаются к линейным. При осреднении профиля концентрации солей по сезонам и по области моделирования получаем следующее выражение:

$$C(z) = 115 \exp(-0,3z - 0,15) \quad (7)$$

3. При распространении примеси от группы точечных источников образуются локальные максимумы концентрации [2]. Наиболее ярко эти локальные максимумы прояв-

ляются при минимальной дисперсии направлений ветра. Координаты локальных максимумов легко определяются из системы линейных уравнений, как пересечения шлейфов i -го и j -го источника для направлений ветра k и l [3].

При формализации поля концентрации солей с постакавальной суши вся область моделирования разделена на две части относительно широты Муйнака ($43^\circ 40'$ с.ш.). Северная часть является источником выноса солей, южная – засоляемой областью.

В результате статистической обработки результатов модельных расчетов выявлена линейная связь сухих выпадений солевого аэрозоля и годового выноса со всей постакавальной суши:

$$C_{ii}(x, y, z) = k(x, y, z) V \quad (8)$$

здесь k – коэффициент, зависящий от преобладающего направления ветра в расчетном периоде, C_{ii} – наземная концентрация (сухие выпадения) солей для вышеуказанной параллели (кг/га).

К югу от параллели Муйнака поле концентрации солей удовлетворительно аппроксимируется формулой:

$$C(x, y, z) = C_{ii} \exp(-0,015x - 0,3z - 0,6) \quad (9)$$

где x – расстояние в южном направлении от широты Муйнака (км), z – высота (км).

Формула (9) представляет среднегодовую концентрацию полидисперсного солевого аэрозоля с постакавальной суши Аральского моря для N -го десятилетия. Средний радиус частиц был принят равным 5 мкм.

Потфракционные расчеты (отдельно для частиц с радиусом 1-10мкм и для частиц с радиусом 1-0,5мкм) показали существенную разницу в пространственном распределении концентрации солей. Грубодисперсный солевой аэрозоль (1-10мкм), время жизни которого 2-3 дня от начала пылевой бури, выпадает в основном на расстоянии не более 150 км. Учитывая преобладание в регионе ветров северных румбов, концентрация грубодисперсного аэрозоля экспоненциально уменьшается с севера на юг. Атмосферный перенос тонкодисперсного аэрозоля (время жизни – до нескольких месяцев при отсутствии осадков) во время пылевой бури происходит на высоте нескольких км. Основная масса тонкодисперсного аэрозоля осаждается на расстоянии 200-400 км к югу от постакавальной суши. Учитывая малую скорость осаждения (0,01см/с), продолжительность присутствия солевой пыли в воздухе гораздо выше в южных районах по сравнению с северными районами, в которых в течение нескольких дней после пылевой бури осаждается преимущественно грубодисперсная фракция солей. Таким образом, количество дней с загрязненным сульфатами воздухом возрастает с севера на юг.

Влияние солепереноса на здоровье. Фактор солепереноса (70 млн.т/год) в последнее время стал доминирующим в ухудшении качества атмосферного воздуха. Вследствие загрязнения атмосферы соевым аэрозолем по данным специалистов [4] состояние здоровья населения заметно ухудшилось по целому ряду показателей. Особое внимание в структуре заболеваемости обращает на себя рост таких экологически обусловленных заболеваний, как заболевания органов дыхания, пищеварения и онкологической патологии. Болезни органов дыхания занимают одно из ведущих мест в структуре заболеваемости населения Южного Приаралья: их вклад в заболеваемость всего населения составляет 38,9%, детского населения 46,4% [5].

Проведенное казахстанскими учеными комплексное обследование органов дыхания у детей Приаралья позво-

лило выявить новые болезни с особенностями течения хронических заболеваний верхних и нижних дыхательных путей, а также впервые диагностировать интерстициальные повреждения легких, приводящие к глубоким функциональным и цитоморфологическим изменениям легочной ткани, что является следствием неблагоприятной ситуации и загрязненности воздушного бассейна соевыми частицами [6].

Вместе с тем ввиду уникальности масштабного ветрового выноса солей с обсохшего дна Аральского моря количественные оценки связи повышенной концентрации сульфатов и хлоридов в атмосфере с ростом числа заболеваний дыхательных путей отсутствуют. Наши исследования, направленные на восполнение этого пробела, позволили выявить корреляционные зависимости первичной заболеваемости населения Южного Приаралья болезнями дыхательных путей с динамикой концентрации сульфатов в воздухе.

Достаточно длинные ряды использованных данных

(1965-2013гг.) обосновывают корректность применения статистических методов. Согласно вышесказанному, модельные расчеты проводились только для тонкодисперсной фракции (0,2 мкм). Результаты моделирования (концентрация солей на уровне 2м) с разрешением 1 год по времени и 5х5км по горизонтали сопоставлялись с данными по числу заболеваний дыхательных путей на тыс. населения.

Было выполнено 2 варианта корреляционного анализа для всех районов Республики Каракалпакстан: с необработанными и сглаженными медицинскими данными. В исходных данных по всем районам наблюдаются крутые максимумы, совпадающие по времени с диспансеризацией и акциями международной организации «Врачи без границ». Кроме того, в исходных данных присутствуют шумы, связанные с человеческим фактором (обращаемость в медицинские учреждения) и с объективной возможностью населения пользоваться медицинским обслуживанием (рис.3).

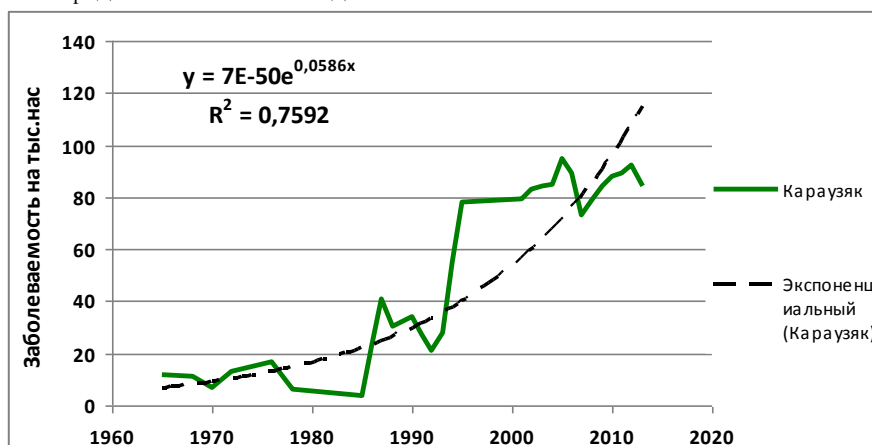


Рис.3 Исходные и сглаженные данные по заболеваниям органов дыхания и их экспоненциальный тренд (Караузякский район РК)

Несмотря на это, сопоставление необработанных медицинских данных с данными по динамике концентрации солей в воздухе показало высокую коррелированность обоих рядов данных. Согласованность пространственной и временной динамики поля концентрации солей на уровне 2

м и динамики заболеваемости болезнями органов дыхания подтверждает существенную связь этих двух процессов. Средний по республике коэффициент корреляции для необработанных медицинских данных составляет 0,72 (табл.2), а для сглаженных – 0,91.

Таблица 2. Пространственная и временная динамика заболеваемости на тыс. населения РК болезнями органов дыхания

№	Районы	Заболеваемость на тыс. населения болезнями органов дыхания			Корреляция
		1965	1995	2013	
1	Муйнакский	4	12	45	0,77349
2	Кунградский	9	32	51	0,620234
3	Караузякский	12	78	84	0,804546
4	Тахтакупырский	10	28	62	0,840648
5	Чимбайский	10	64	55	0,197347
6	Канлыккульский	2	14	37	0,417345
7	Кегейликий	12	37	79	0,879401
8	Шуманайский	9	68	47	0,772407
9	Нукусский	2	42	34	0,327841
10	Ходжейлинский	12	58	41	0,493983
11	Амударьинский	14	47	129	0,897819
12	Эликкалинский	14	135	137	0,751266
13	Берунийский	12	32	98	0,96735
14	Турткульский	12	37	82	0,921305
Средний по РК коэффициент корреляции					0,7233025



Табл.2 наглядно показывает неуклонный рост заболеваемости в периоде 1965-2013гг., а также пространственное совпадение поля концентрации солей с динамикой заболеваний дыхательных путей по районам. Высокий коэффициент корреляции ($r=0,7$) обосновывает актуальность продолжения данного исследования относительно динамики других патологий в Южном Приаралье.

В заключение отметим, что ввиду масштабности выноса солей с постаквальной суши Аральского исследование

указанной связи актуально не только для Южного Приаралья, но и для других прилегающих территорий. Этой проблемой также озабочены ученые России: исследуется динамика роста отдельных видов заболеваний на Южном Урале и в Приволжье по сравнению с 1980 годом и показатели ухудшения данных по заболеваниям непосредственно в те дни, когда происходит загрязнение территории вредными солями [7].

Литература:

1. Арушанов М. Л., Тлеумуратова Б. С. Динамика экологических процессов Южного Приаралья. /Гамбург: Palmari-um. – 2012. – 183 с.
2. Тлеумуратова Б.С. Математическое моделирование переноса аэрозоля в нижних слоях атмосферы: Дисс.канд. физ.-мат. наук.–Ташкент, 2004.–138с.
3. Тлеумуратова Б.С. Математическое моделирование выноса солей с осушившегося дна Аральского моря при пылевых бурях // Объединенный научный журнал. – М., 2002. – № 28(51). – С.40 – 42.
4. Абдиров Ч.А., Курбанов А.Б., Константинова Л.Г. Медико-экологическая ситуация в Республике Каракалпакстан и прогноз заболеваемости населения: – Нукус: Каракалпакстан, 1996. – 19 с.
5. Мамбетуллаева С.М. Анализ факторов, влияющих на состояние здоровья населения в условиях экологического кризиса в Южном Приаралье // Журн. International jurnal on Immunorehabilitation. -М., «Медицина –Здоровье», февраль,2004. -Том 6.- №1.- с.169
6. Мажитова З.Х., Сейсебаева Р.Ж., Умбетова Л.Ж. Новые болезни органов дыхания у детей проживающих в условиях загрязнения воздушного бассейна пыле-солевыми частицами. http://www.albany.edu/ihe/Conferences/Almaty-2005/word_docs/SeysebaevaRu.rtf
7. Институт географии РАН. Информационный портал. <http://igras.ru/index/php?id=67938r=18>