

УДК 378.14

**ГИС-ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПЫЛЬНЫХ БУРЬ**

Доктор техн. наук	Э.А. Закарин
Канд. техн. наук	Т.В. Дедова
Канд. физ.-мат. наук	О.Е. Семенов
	А.П. Шапов
	Н.Б. Тусеева

*Разработана ГИС-технология мониторинга и моделирования пыльных бурь, которая позволяет выполнять комплексный анализ и оценивать масштабы процесса выноса аэрозоля. Проведена тестовая прогонка модели по расчетам эпизодов пыльных бурь в районе тестового полигона южнее г. Жезказган.*

Проблема мониторинга и моделирования пыльных бурь привлекает большое внимание ученых Казахстана, России, ближнего и дальнего зарубежья [1, 3, 7, 8, 9] в связи с тем, что пыльные бури относятся к опасным метеорологическим явлениям и являются мощным источником аэрозольного загрязнения атмосферы. При этом перенос аэрозоля носит трансграничный характер и вредному воздействию этих явлений подвержены большие прилегающие территории. Проблема усугубляется непрерывным образованием новых очагов выноса аэрозолей вследствие деградации земель.

В данной работе при рассмотрении задачи по переносу соли и песка использовались самые современные методы мониторинга, заключающиеся в интеграции в единую технологическую цепочку методов дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования (Рис. 1).

Для решения задачи была разработана процедура, состоящая из следующих этапов:

- обнаружение и регистрация пыльных бурь на территории тестового полигона по данным космического мониторинга;
- построение маски очагов выноса аэрозоля на базе данных космического зондирования и полевых наблюдений, т.е. карты почв тестового полигона, обладающих эмиссионной способностью различной интенсивности и различного дисперсного состава;

- разработка геоинформационной модели подъема аэрозольных частиц в зависимости от скорости приземного ветра, температуры почвы, размеров частиц и других параметров задачи;
- разработка математической модель шлейфов выноса и выпадения аэрозоля на прилегающие территории с использованием данных метеорологических наблюдений и свойств подстилающей поверхности;
- верификация моделей путем сравнительного анализа расчетных данных с данными съемок эпизодов пыльных бурь с космических аппаратов Aqua/MODIS и Terra/MODIS.

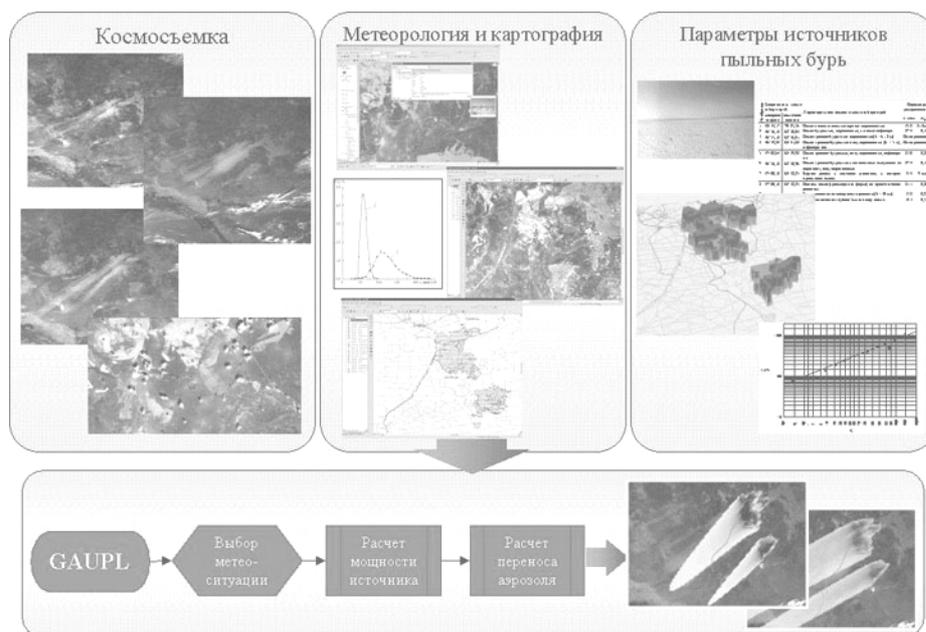


Рис. 1. Технология мониторинга и моделирования пыльных бурь.

Для проведения мониторинга и моделирования пыльных бурь, выбран тестовый полигон, лежащий в диапазоне координат: 46° с.ш. 67° в.д. – 48° с.ш. 70° в.д. Регион повышенной повторяемости пыльных бурь в Центральном Казахстане, т.е. в районе метеостанций Карсакпай – Жезказган выделяется по своему происхождению. Его расположение в широкой долине реки Сарысу между двумя горными поднятиями Улугтау и Казахским мелкосопочником определяет здесь режим повышенных скоростей ветра.

Источник аэрозоля природного происхождения находится на крайнем юго-западе Сарысу-Тенгизской физико-географической провинции на границе с Бетпак-Далинской и Северо-Приаральской провинциями. Поэтому в этом регионе встречается большое разнообразие почвенных условий.

Днища и террасы древних широких долин р. Сарысу сложены песчаным и песчано-галечниковым аллювием. На аллювиальных террасах преобладают светло-каштановые супесчаные и песчаные почвы. Пески террас часто перевеяны и представляют системы пологих бугров и гряд. Плащи навееянных песков наблюдаются на педиментах и склонах мелкосопочных массивов. Все эти поверхности подвергаются интенсивному выветриванию [4, 6,].

По механическому составу серо-бурые почвы Бетпак-Далы преимущественно легко- и среднесуглинистые. Особенность этих почв – преобладание в них мелкопесчаных и крупнопылеватых фракций размерности 0,25...0,05 мм (250...50 мкм.) [5]. Как известно, частицы этого размера наиболее легко подвергаются выдуванию. Источником пыления здесь являются поверхности, сложенные серо-бурыми пустынными почвами легкосуглинистого состава с хрупкой пористой поверхностной супесчаной коркой. Поверхность Северо-Аральской провинции, как известно, также подвергается воздействию эоловых процессов значительной интенсивности.

Космический мониторинг данного региона позволил зафиксировать ряд мощных пыльных бурь (Рис. 2) в период 2005...2006 гг., причем интенсивное пыление в этом районе началось с лета 2005 года. Более ранние съемки этого полигона не зафиксировали ни очагов пыления, ни пыльных бурь.

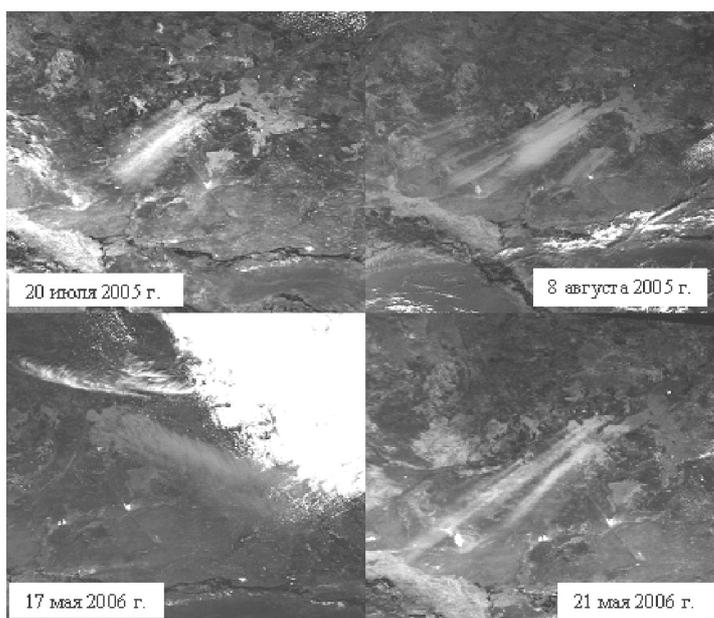


Рис. 2. Эпизоды пыльных бурь зафиксированные по космоснимкам.

Дальнейшие исследования позволили выявить причину возникновения очагов выноса аэрозоля. С этой целью были проанализированы данные космического мониторинга в тепловом диапазоне. Как показали эти снимки, в июне – июле 2005 г. в этом районе полыхали степные пожары. В результате выгорела растительность, и именно эти места стали источниками пыления и, как следствие, сформировался процесс интенсивного ветрового выноса частиц почвогрунтов, песков и солей.

Для распознавания ландшафтных изменений и выделения источников пыльных бурь была использована процедура «Анализ изменения пространственных объектов во времени (Change Detection)». Результаты анализа представляют собой распределение вероятности изменения каждого пикселя. На цветном изображении в красноватой палитре изображены пиксели, для которых вероятность изменения составляет 90...100 % (рис. 3). На космоснимках хорошо идентифицируются источники пыльных бурь. Анализ показал, что в результате пожаров 2005 г. образовались очаги пыльных бурь общей площадью 4500 км<sup>2</sup>.

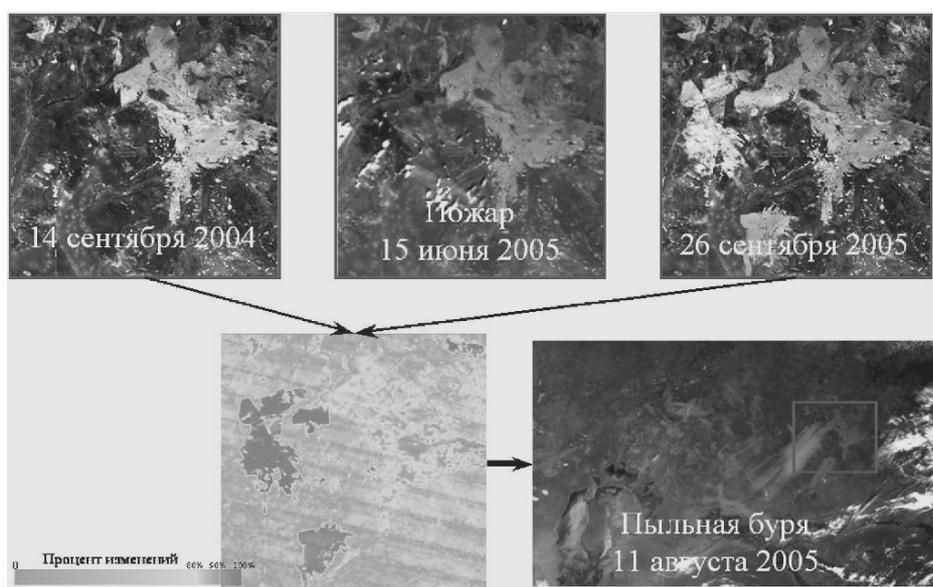


Рис. 3. Выявление источников пыльных бурь по космоснимкам.

Для поиска и описания физических характеристик источников выноса аэрозоля, обнаруженных на космических снимках Центрального Казахстана за осенний период 2005 г., в мае 2006 г. была проведена экспедиция в районы, расположенные восточнее и южнее г. Жезказгана.

Во время экспедиции отобраны пробы песка для определения функции распределения частиц песка по размерам и вычислений парамет-

ров этих функций. Образцы взяты из песков Талды, Жетиконьр и севернее поселка Жайрем. Проведена ландшафтная фотосъемка для геоморфологической характеристики поверхности песков, крупного солончака Кутансор и степи в районе меднорудного месторождения Жаманайбат. Из солончака Кутансор взята соль с его поверхности для продувки в аэродинамической трубе КазНИИЭЖ с целью определения критического значения скорости начала ее развевания ветром.

Проведенная экспедиция подтвердила, что объектом интенсивного развевания стали большие площади песчаных почв на левой стороне долины реки Сарысу, прилегающие к пескам Жетиконьр с запада. Поверхность, сложенная этими песчаными почвами, представляет собой слабо волнистую равнину. Причиной начала их выветривания стали пожары сухой растительности летом 2005 г., в результате чего песчаная почва оказалась полностью лишена растительного покрова (Рис. 4).



*Рис. 4. Источники интенсивного потока аэрозолей в атмосферу, вызванные пожарами растительного покрова.* Во время экспедиционного исследования в мае 2006 г. поверхности, образовавшиеся после пожара, остались оголенными – растительность на них не развивается. При ветрах скоростью 5...7 м/с, которые наблюдались во время наших обследований, на этих поверхностях наблюдались слабые пыльные бури. Очевидно, что в районах с повышенными скоростями ветра степные пожары на легких по механическому составу почвах способствуют развитию на них интенсивных дефляционных процессов. Процесс дефляции почвогрунтов является функцией большого числа параметров, характеризующих как состояние приземного слоя атмосферы, так и деятельного поверхностного слоя грунта. Как показывают выполненные исследования, такие важные характеристики выдувания песка и почв, как критическая скорость начала выветривания частиц твердой фазы, критическое значение влажности песка, горизонтальный и вертикальный поток массы определяются дисперсным составом, т.е. функцией

распределения частиц по размерам и, главным образом, средним геометрическим размером зерен. Поэтому изучение дисперсного состава песка и почв является одной из основных задач при моделировании песчаных и пыльных бурь. Основные результаты проведенной экспедиции отражены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты ситового анализа образцов песка, отобранных на песчаных массивах юго-запада Карагандинской области

Номер образца	Доля частиц размером меньше $x$ (мкм), %									
	50	73	100	140	200	250	315	500	1100	2000
1	0,7	1,5	2,8	9	14	19,2	27,9	38,6	58,7	99,9
2	0	0	0,1	8,3	21,9	36,1	56,4	83,3	98,5	99,9
3	0,1	0,2	0,4	10	12,6	14,9	18,7	25,1	75,8	99,9
4	1,8	2,3	13,4	34,3	36,7	37,9	41	43,1	59,5	99,9
5	0,7	1,3	2,5	34	55,3	63,4	69,3	77,5	95	99,9
6	0	0	0,2	8,3	24,1	39,5	56,7	84,4	99,3	99,9
7	0,3	0,5	0,6	2	4,3	10,9	31,5	84,4	99,3	99,9
8	1	7,6	16,6	31,7	36,3	42,4	59,1	82,4	90,9	99,9
9	0	0,2	1,9	7	9,2	12,7	23,9	55,5	76,6	99,9
10	5,1	11,6	18,4	36,3	42,5	48,8	64,6	85,2	90,6	99,9

Таблица 2

Параметры распределения частиц песка по размерам в различных местах песков Талды, Жетиконыр и севернее пос. Жайрем (Караган. обл.)

№ образца	Координаты места отбора проб		Характеристика песков и места отбора проб	Параметры распределения	
	с.ш.	в.д.		$x_0$ , мкм	$\sigma_{г x}$
1	48°34,17'	70°25,56'	Пески пологоволнистые хорошо закрепленные	452	218
2	46°56,12'	68°30,04'	Пески бугристые, закрепленные, с язвами дефляции	274	0,18
3	46°55,12'	68°36,01'	Пески грядово-бугристые закрепленные ( $h = 6 \dots 8$ м)	не определены	
4	46°59,84'	68°41,62'	Пески грядово-бугристые полузакрепленные ( $h = 5$ м), дефляции нет	не определены	
5	47°02,64'	68°39,92'	Пески грядово-бугристые, полузакрепленные, дефляции нет	230	0,22
6	46°56,18'	68°30,96'	Пески грядово-бугристые с котловинами выдувания на вершинах, полузакрепленные	274	0,18
7	47°00,12'	68°32,25'	Бархан рядом с песчаной равниной, с которой происходит вынос	354	91
8	47°00,12'	68°32,25'	Наносы песка (транспортная форма) на краю песчаной равнины	211	0,26

№ образца	Координаты места отбора проб		Характеристика песков и места отбора проб	Параметры распределения	
	с.ш.	в.д.		$\mu_0$ , мкм	$\sigma_{lg x}$
9	47°00,12'	68°32,25'	Коса навевания на поверхности равнины (h = 30 см)	332	0,23
10	47°00,12'	68°32,25'	Песчаная почва на глубине 5 см от поверхности	193	0,33

*Примечание:* У образцов 1 и 7 нормальное распределение с параметрами  $\mu_x$  и  $\sigma_x$ .

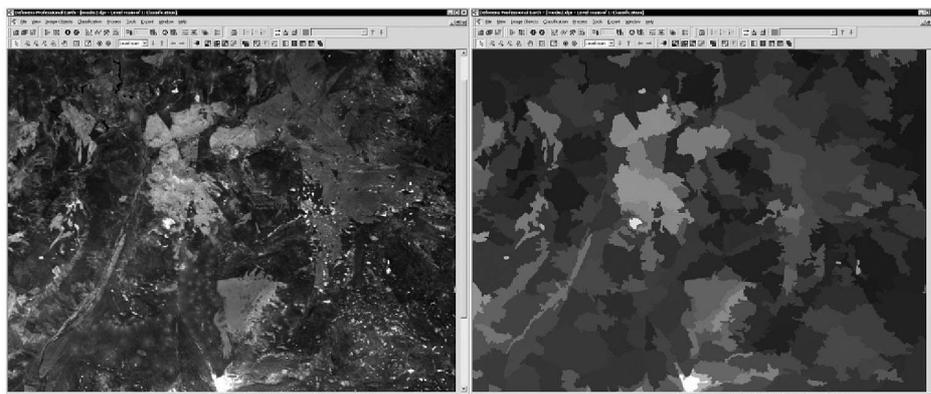
На каждый взятый образец была построена эмпирическая интегральная кривая распределения частиц песка по размерам и получено подробное описание источников атмосферного аэрозоля.

В результате проведенной экспедиции были собраны основные входные данные для построения маски очагов выноса аэрозоля на базе данных космического зондирования, т.е. карты источников пыльных бурь, обладающих эмиссионной способностью различной интенсивности и различного дисперсного состава. Кроме того в карту источников занесены данные, необходимые для дальнейшего моделирования пыльных бурь, такие как критическая динамическая скорость для различных типов выдуваемой поверхности.

Карта источников пыльных бурь данного региона строилась на базе данных дистанционного зондирования. Обработка космических снимков среднего разрешения, основываясь на данных наземных исследований, дает возможность построить ландшафтную карту изучаемого района с указанием классов песчаных массивов [2] и, в конечном итоге обеспечивает выделение маски источников пыльных бурь различной эмиссионной способности.

Для анализа выбирались безоблачные космоснимки в период проведения экспедиционных работ. Дальнейшая обработка шла с использованием современного инструмента объектно-ориентированного дешифрирования изображений – Definiens Professional 5.0 (Definiens AG – The Image Intelligence Company. <http://www.definiens.com>).

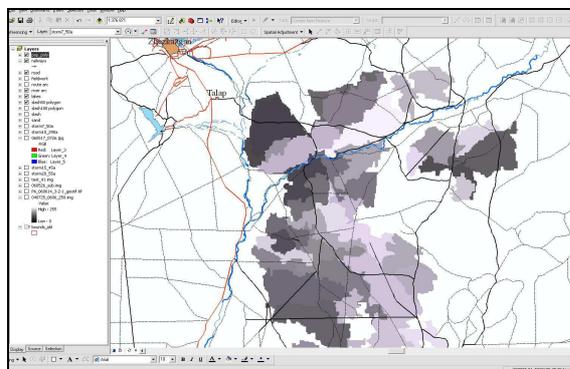
В этом программном продукте реализован многоступенчатый итеративный процесс выделения и классификации объектов на изображении на основе методов, закладываемых в базу знаний. Вначале проводится сегментация, то есть выделяются области однородности яркости, цвета и текстуры, каждая из которых выделяется в отдельный полигон (сегмент) (Рис. 5).



*Рис. 5. Сегментация космоснимка.*

После сегментации каждый полигон относится к тому или иному классу объектов соответственно описаниям, заданным в базе знаний. Таким образом, получается первый вариант дешифрирования изображения. Теперь, на основе проведенной классификации, возможны операции разбиения, слияния и изменения классовой принадлежности сегментов на основе их пространственных отношений. Полученные в итоге объекты экспортируются в векторный формат для передачи в ГИС, при этом они сопровождаются атрибутами, описывающими свойства объектов.

Для исследуемого полигона проводилась классификация обнаруженных очагов пыльных бурь (выгоревших поверхностей, песчаных барханов, солончаков) с указанием данных, полученных при полевых исследованиях (Рис. 6). Идентифицированные источники в векторном формате экспортировались в геоинформационную систему.



*Рис. 6. Карта источников пыльных бурь.*

Полученная таким образом карта источников пыльных бурь используется в качестве входной информации для геоинформационного моделирования процессов пыльных бурь.

В рамках данной работы, используя данные экспедиционных исследований, была построена серия основных и вспомогательных моделей для расчета подъема и выноса аэрозолей. Эти модели накапливаются в виде специальных подпрограмм в блоке процедур обработки. Далее на их основе строится технология моделирования рассматриваемого процесса.

**Процесс моделирования состоит из двух этапов:**

1. Первичная обработка, которая включает процесс подготовки входных пространственных данных путем векторизации и GRID-преобразований. Этот этап является необходимым в подготовке требуемых данных для математического моделирования.

2. Собственно процесс моделирования, который предполагает последовательный расчет подъема и переноса аэрозольных частиц. Созданная иерархия моделей состоит из следующих подпрограмм: DS\_MASS – расчет дисперсной структуры подстилающей песчаной поверхности и мощности поверхностного источника (потока массы) (Рис. 7); DS\_GAUSS – расчет шлейфа пыльной бури по Гауссовой модели.



*Рис. 7. Расчет мощности поверхностного источника.*

Задачей геоинформационного моделирования является также и построения интерфейса с пользователем (в том числе с исследователем). С этой целью был разработан ряд сервисных программ визуализации полученных результатов (Рис. 8). Завершающим этапом моделирования является верификация полученных результатов путем сравнения с данными дистанционного зондирования.

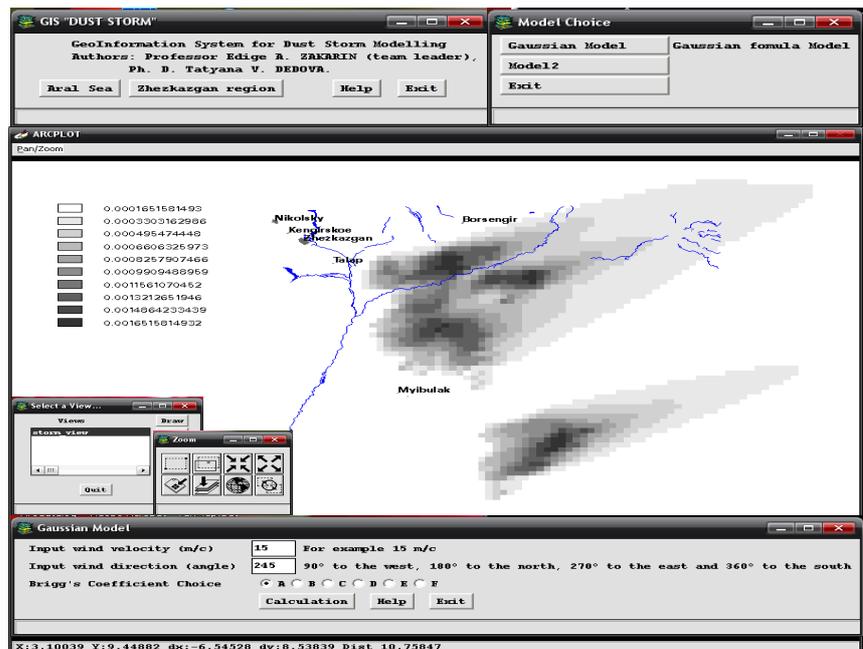


Рис. 8. Моделирование пыльных бурь.

В качестве тестового прогона разработанной технологии были выбраны зафиксированные с помощью космического мониторинга эпизоды пыльных бурь. В первом случае была выбрана пыльная буря 11 августа 2005 года. Снимок бури получен со спутника TERRA /MODIS 11 августа 2005 06:19 (GMT). По данным метеорологических наблюдений (табл. 3) на эту дату в г. Жезказган зафиксированы следующие значения [Архив фактической погоды. <http://meteo.infospace.ru>].

Таблица 3

Наблюдения в течение суток (атмосфера) 11.08.2005 г., г. Жезказган

Местное время / GMT	Температура воздуха, °С	Давление, мм (гПа)	Относительная влажность, %	Точка росы, °С	Ветер		Видимость, км
					d	v, м/с	
00:00 / 18:00	22,1	754 (1006)	40	8,0	СВ	8	20
06:00 / 00:00	14,6	757 (1009)	52	5,0	СВ	10	20
12:00 / 06:00	19,3	758 (1010)	30	1,1	СВ	7	20
18:00 / 12:00	22,6	757 (1010)	19	-1,9	СВ	6	20
Среднее	19,6	756 (1009)	35			8	

В соответствии с метеорологическими данными для моделирования был выбран северо-восточный ветер скоростью 7 м/с (Рис. 9). Во втором случае была выбрана пыльная буря, зафиксированная на снимке со спутника TERRA /MODIS 17 мая 2006 г. 07:26 (GMT). Результаты наблюдений на метеорологической станции в г. Жезказгана в этот день приведены в табл. 4 [Архив погоды. <http://www.gismeteo.ru/synarc.htm>].

Таблица 4

Наблюдения в течение суток (атмосфера) 17.05.2006 г., г. Жезказган

Время GMT	Температура, °С	Давление, мм	Влажность, %	Ветер		Облачность	Явления
				d	v, м/с		
00:00	10	726	76	3	10	40	Нет
03:00	13	726	58	3	10	40	ПЫЛЬ
06:00	18	727	39	3	9	10	ПЫЛЬ
09:00	23	730	20	СЗ	9	60	ПЫЛЬ
12:00	24	732	20	СЗ	8	70...80	Нет
15:00	21	733	35	СЗ	4	Ясно	Нет
18:00	12	735	66	Штиль		Ясно	Нет

Для моделирования был выбран западный ветер скоростью 9 м/с (Рис. 9).

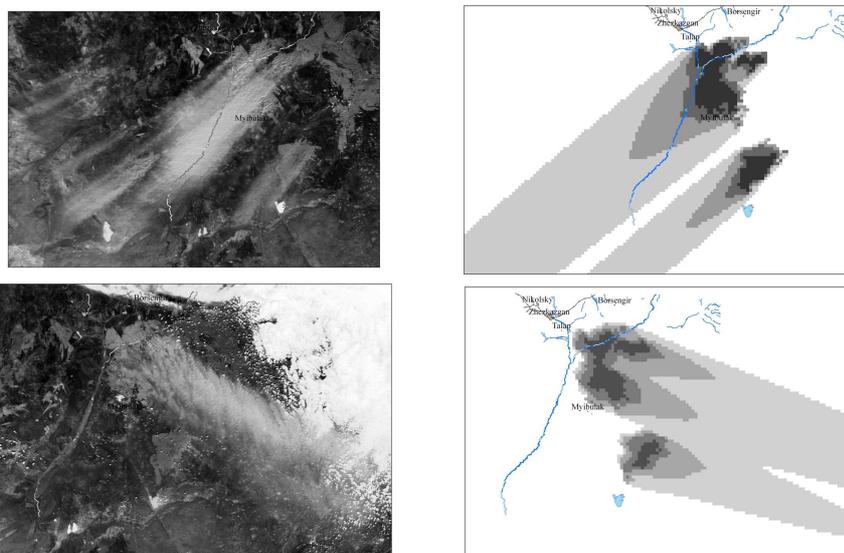


Рис. 9. Сопоставление результатов моделирования с данными дистанционного зондирования.

Дальнейший мониторинг исследуемого района показал, что начиная с 2007 г., стало наблюдаться уменьшение частоты и интенсивности пыльных бурь. С 2009 г., не удалось зафиксировать пыльные бури из космоса на тестовом полигоне. Тематическая обработка космоснимков показала, что на данной территории восстановился растительный покров, что привело к прекращению процессов пыльных бурь. Тем не менее, обширность территорий, динамичность процессов пыльных бурь в республике в целом диктует использование современных методов математического моделирования и дистанционного зондирования. Таким образом, разработанная ГИС-технология мониторинга и моделирования пыльных бурь позволит не только описывать процесс пыльных бурь, выполнять их комплексный анализ, оценивать масштабы процесса, но и будет являться чрезвычайно актуальной для выработки конкретных решений по управлению территорией в случае чрезвычайных ситуаций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алоян А.Е., Андропова А.В., Арутюнян В.О., Гранберг И.Г., Кудерина Т.М., Пономарев В.М. Эмиссия и перенос почвенных частиц в аридных регионах (Калмыкия, Приаралье) // Тез. Конф. «Физика атмосферного аэрозоля» – М. 12-17 апреля 1999 г. – С. 17-18.
2. Мониторинг песчано-солевых бурь Арала. Отчет о НИР/ ИКИ (заключительный) Книга 3. Договор № 6ХД/98 “А”. – Алматы, 1999. – 87 с. Отв. исполн. Б.В. Гельдыев
3. Разаков Р.М., Косназаров В.А. Эоловый вынос и выпадение солепылевых частиц в Приаралье // Проблемы Аральского моря и природоохранные мероприятия. – Ташкент, 1987. – С. 24-32.
4. Сваричевская З.А. Геоморфология Казахстана и Средней Азии. – Л.: Изд-во Ленинградского гос. ун-та, 1965. – 296 с.
5. Фаизов К.Ш. Почвы пустыни Бетпак-Дала // Известия НАН РК. Биологическая серия. – 1994. – №4. – С. 69-74.
6. Физико-географическое районирование СССР / Под. ред. Н.А. Гвоздецкого. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – 576 с.
7. Dulas F., Takre D., Bermametti G., Buat-Menard P., Desbois M., Sutton D. Assessment of the African airborne dust mass over The Western Mediterranean sea using Meteosat data. // J. Geophysical Res. D. – 1992-97, №2. – P. 2489-2506.
8. Liu, Chuntao; Cheng, Linsheng.: Parameterization of mobilization and transport of sand-dust during black storm and mesoscale numerical ex-

periments // Acta Meteorologica Sinica, Beijing, China. – 1999. – 13(3) – P. 316-330.

9. Shuenn-Chin Chang, Charles C.-K. Chou, Wei-Nai Chen, Chung-Te Lee Asian dust and pollution transport comprehensive observation in the downwind Taiwan in 2006 // Atmospheric Research – 2010. – Volume 95. Issue 1. – P. 19-31.

АО «КАЗГЕОКОСМОС», г. Алматы,

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

### **ШАҢДЫ ДАУЫЛДАРДЫ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ БАҚЫЛАУДЫҢ ГАЗ-ТЕХНОЛОГИЯСЫ**

Техн. ғылымд. докторы	Е.А. Закарин
Техн. ғылымд. канд.	Т.В. Дедова
Физ.-мат. ғылымд. канд.	О.Е. Семенов
	А.П. Шапов
	Н.Б. Тусеева

*Аэрозоль тасымалының ауқымдылығын кешенді түрде сараптап бағалауға мүмкіндік беретін шаңды дауылдарды модельдеу және бақылаудың ГАЗ-технологиясы анықталды. Жезқазған қаласынан оңтүстікке қарай орналасқан тесттік полигон аймағында шаңды дауылдардың эпизодтарының есептері бойынша модель сынағы өткізілді.*