

Анализ динамики зоны солепылевых выносов с осушенного дна Аральского моря по многолетним спутниковым данным

Л.Ф. Спивак, А.Г. Терехов, И.С. Витковская, М.Ж. Батырбаева

АО «Национальный центр космических исследований и технологий» НКА РК

ул.Шевченко 15, Алматы, 050010, Казахстан

E-mail: ivs-iki@rambler.ru

В статье описана оригинальная методика, примененная для идентификации и описания активного очага солепылевого выноса в восточной части осушенного дна Аральского моря. Прослежена динамика изменения площади зоны выноса за 2005-2008 годы с прогнозом возможного развития ситуации на ближайшие 10 лет.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли из космоса, Аральское море, соле-пылевые бури, очаг выноса, анализ.

Введение

Быстрая деградация Аральского моря в последние 20 лет привела к интенсификации ветрового выноса соли и пыли с осушенного дна. Особенности механических свойств поверхности бывшего дна и отсутствие развитого и стабильного растительного покрова способствуют интенсивной ветровой эрозии. Вероятность возникновения пыльной бури на территории бывшего моря в сотни раз выше, чем на окружающих территориях. Продолжающееся обнажение дна способствует развитию имеющихся и возникновению новых очагов солепылевых бурь. Интенсивный вынос соли и ее ветровой перенос на большие расстояния может оказывать негативное влияние на экологию окружающих регионов. Мониторинг, оценка и прогноз развития аральских пыльных бурь представляет значительный интерес как в научном, так в экологическом и социальном аспектах.

Исходные данные и методика пространственной локализации зоны выноса аэрозоля

Катастрофическая деградация Аральского моря последних десятилетий является основной причиной возникновения регулярных пыльных бурь с осушенного дна. Освободившаяся от воды и высохшая поверхность бывшего дна, пропитанная солью, в условиях сильного ветра генерирует в большом количестве аэрозольные частицы, переносимые на значительные расстояния. Вероятность возникновения пыльной бури на высохшем дне моря существенно выше по сравнению с окружающими территориями, поскольку структура поверхности высохшего дна нестабильна и легко подвергается ветровой эрозии. Возникновение пыльных бурь наиболее вероятно в весенний период, когда поверхность почвы высыхает, освобождаясь от накопленной в зимний период влаги, а вегетация еще минимальна. Данные дистанционного зондирования позволяют распознать пыльную бурю, оценить размеры очагов выноса аэрозоля, проследить их динамику. На рисунке 1 показан типичный эпизод пыльной бури с осушенного дна Аральского моря по спутниковым данным NOAA/AVHRR (разрешение 1 км).

Ежедневные спутниковые данные NOAA/AVHRR являются одним из наиболее удобных источников информации об интенсивности и пространственной структуре эпизодов пыльных бурь в малонаселенном районе Аральского моря.



Рис. 1. Эпизод пыльной бури с осушенного дна Аральского моря по спутниковым данным NOAA/AVHRR за 9 мая 2007 года

Пыльная буря с осушенного дна Аральского моря – особое атмосферное явление, вызванное нестабильной структурой поверхности почвы в условиях сильного приземного ветра. Поднимающиеся в воздух мелкие частицы пыли и соли на спутниковых снимках формируют специфические образования, схожие с разреженными облаками или дымками. Характерной особенностью аральской пыльной бури является пространственная привязка солепылевого облака к очагам ветровой эрозии на осушенном дне. Очаги выноса образуются повсеместно на некотором удалении от водного зеркала, когда увлажнение поверхности за счет фильтрационных вод становится несущественным.

Многообразие возможных спектральных характеристик подстилающей поверхности при наличии в атмосфере аэрозольного компонента затрудняет разработку автоматических алгоритмов распознавания и анализа характеристик пыльных бурь. Поэтому, в настоящий момент основой распознавания и первичной обработки эпизодов пыльных бурь является экспертное дешифрирование. На второй стадии обработки, включающей создание и обработку баз данных по эпизодам пыльных бурь, используются различные математические методики обработки.

Для мониторинга региона использовались дневные снимки NOAA/AVHRR с разрешением 1100 м в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра (1, 2 канал) за период 2005-2008 гг. Определенную помощь в анализе также оказывали данные инфракрасных каналов (3,4,5 канал). За время наблюдений было выявлено 62 эпизода пыльных бурь, источник которых территориально относился к осушенному дну Аральского моря.

Основными целями экспертной обработки спутниковой информации являются:

- 1 – обнаружение эпизода пыльной бури из массива спутниковой информации, сбор информации обо всех эпизодах в соответствующую базу данных;
- 2 – анализ эпизода пыльной бури с выделением: а) границ аэрозольного облака; б) границ очага выноса и проведение качественной оценки его структуры по уровню интенсивности выноса.

Обработка спутниковых данных включала два уровня.

- экспертное дешифрирование (выделение) самого эпизода пыльной бури из массива спутниковой информации. Определение границ зоны выноса с качественной пространственной характеристикой интенсивности выноса внутри них. Под характеристикой интенсивности понималась локальная степень мутности атмосферы, обусловленная подъемом аэрозольных частиц и текстура пылевых облаков, имеющих специфическое строение над зоной выноса. Математически зона выноса и распределение интенсивности ветровой эрозии внутри ее границ отображалась через систему точек (вершин графа) по принципу, чем выше интенсивность, тем выше плотность отображающих точек;

- математически строгая обработка полученного ряда эпизодов (наборов вершин). Алгоритм близкий к минимально натянутому дереву [1] использовался для получения контура зоны выноса, а медианная фильтрация применялась при вычислении матрицы плотности вершин графа, характеризующей интенсивность ветровой эрозии.

Границы солепылевого аэрозольного образования, схожего по оптическим свойствам с обычным разреженным облаком, определяются по

уровню яркостных контрастов различных объектов на поверхности Земли. Присутствие аэрозольной компоненты в воздухе снижает эти контрасты, одновременно переводя величины коэффициентов отражения в область более высоких значений. Визуально на снимках NOAA подобные образования и их границы достаточно хорошо распознаются. Предварительная обработка может включать псевдоцветные композиты, введение различных индексов (математические комбинации имеющихся каналов), использование отдельных каналов. Спутник фиксирует мгновенную картину, поэтому нет ясности, наблюдается равновесное состояние, или это только начало/конец процесса переноса. Однако, при совместном анализе всей имеющейся

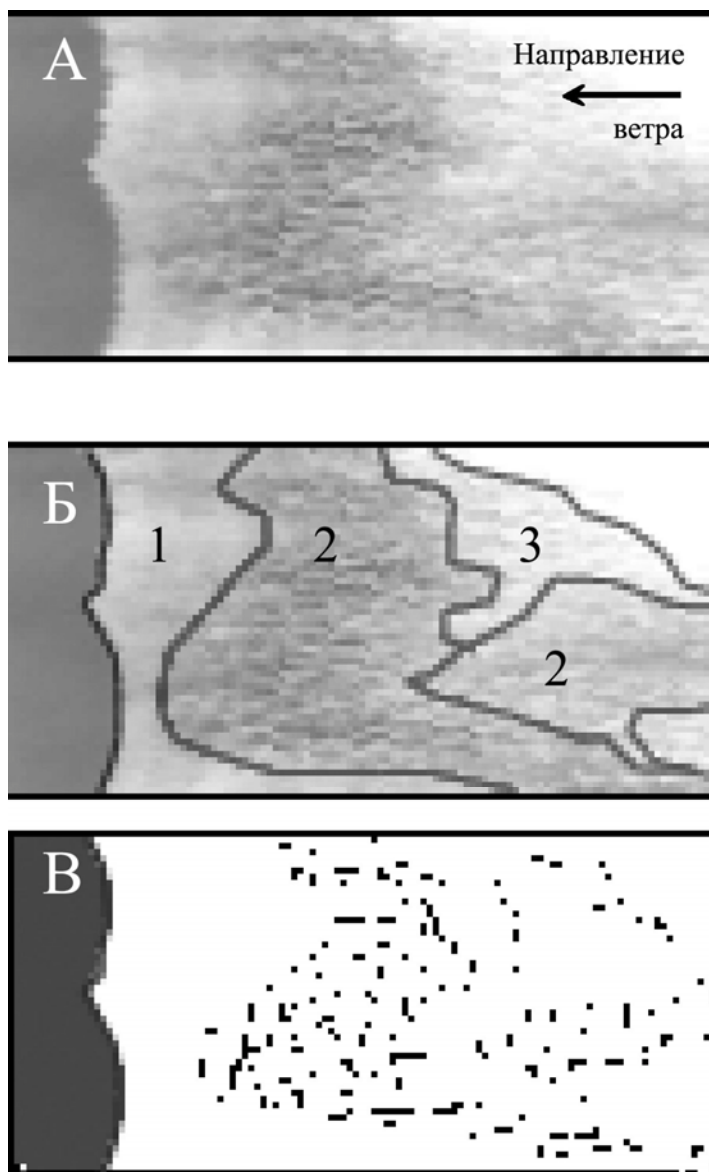


Рис. 2. Основные стадии экспертной обработки отдельных спутниковых снимков региона Аральского моря с эпизодами пыльных бурь. А – исходный снимок (NOAA/AVHRR 10 апреля 2008, канал 4). Б – выделение основных зон: 1. Зона осадения и переноса аэрозольной компоненты. 2. Зона пылесолевого выноса высокой интенсивности. 3. Зона пылесолевого выноса низкой интенсивности. В – отображение структуры зоны пылесолевого выноса через систему вершин

базы сцен пыльных бурь суммарные границы зон переноса аэрозолей за счет большой статистики сводятся к определению наиболее вероятных конфигураций.

Регистрация границ очагов выноса с некоторой оценкой параметра интенсивности переноса представляет собой более сложную задачу. На первом этапе необходимо определить направление ветра. Особенности структуры солепылевых аэрозольных образований в регионе Аральского моря достаточно четко связаны с направлением ветра. При наличии определенного опыта анализа синоптической ситуации и понимания особенностей текстуры аэрозольных образований в процессе пыльных бурь определение направления ветра не встречает затруднений.

Приземный ветровой поток, проходя по территории очага солепылевого выноса, генерирует фронт аэрозольного компонента. За счет крупномасштабной приземной турбулентности фронт состоит из отдельных струй с более высокой скоростью ветра. Двигаясь над неустойчивой осушенной поверхностью дна Аральского моря, эти струи поднимают аэрозольные частицы, формируя характерную неоднородность оптических свойств атмосферы, которая регистрируется спутником. Эта пространственная особенность аэрозольного облака служит признаком, различающим наветренную и подветренную сторону очага выноса. С подветренной стороны в воздухе остается только мелкодисперсная фракция, система отдельных струй разрушается, происходит перемешивание с образованием более или менее однородных структур, характеризующихся плавным изменением оптической плотности.

Таким образом, наличие характерной мелкой структуры взаимодействующих воздушных струй, различающихся по оптической плотности и высоте верхней границы, является дешифровочным признаком территории солепылевого выноса. Над этой территорией формируется специфическая система светотеней, регистрируемая спутником в виде облака особой текстуры.

За очагом выноса в атмосфере происходят только процессы перемешивания мелкодисперсной фракции и осаждения относительно крупных частиц с образованием однородных по оптической плотности солепылевых облаков.

Основные стадии технология экспертной обработки снимков NOAA представлены на рисунке 2.



Рис. 3. Основные математические стадии обработки результатов экспертного дешифрирования спутниковых снимков с эпизодами пыльных бурь.

А – накопление вершин графа, отображающих интенсивность процесса солепылевого выноса в анализируемом временном интервале; Б – расчет контура графа, отображающего зону солепылевого выноса, по алгоритму, близкому к минимально натянутому дереву (построение графа между ближайшими соседями); В – расчет плотности вершин графа внутри расчетной зоны солепылевого выноса с использованием сложного медианного фильтра

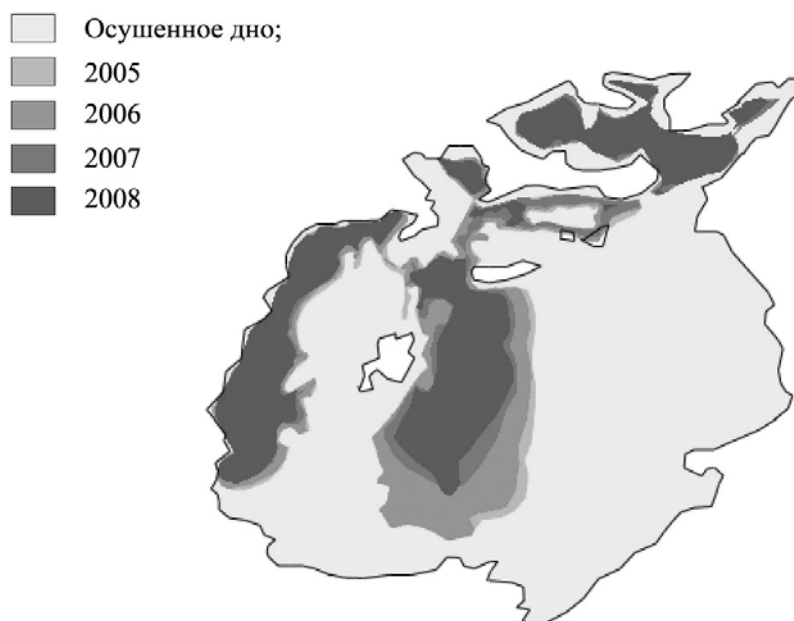


Рис. 4. Изменение водного зеркала Аральского моря в период мониторинга пыльных бурь 2005-2008 гг.

Целью экспертной обработки отдельного эпизода (спутникового снимка) является построение системы точек (вершин графа), выделяющих территорию очага выноса, и определение поля интенсивности выноса. В отсутствии наземной информации под интенсивностью понималась прозрачность и степень текстурной неоднородности солепылевого облака. Экспертное отображение поля интенсивности выноса через систему точек является наиболее простым способом, позволяющим последующими строгими математическими операциями проводить более глубокий анализ с получением средних оценок по конфигурациям зон выноса и внутренней структуре по их интенсивности.

На рисунке 3 представлены стадии математической обработки вершин графа, накопленных в определенном временном окне (наборе спутниковых сцен, относящихся к требуемому временному периоду).

Исследование временной динамики зоны выноса аэрозолей в восточной части Приаралья

За период 2005-2008 годы водное зеркало Арала существенно уменьшилось. Особенно сильно этот процесс проходил в Большом Арале (Восточный Арал), практически не получавшем воды из впадающих в него рек (Сыр-Дарья и Амударья). На рисунке 4 представлены контуры водного зеркала по спутниковым данным NOAA/AVHRR на май каждого года периода мониторинга.

Примеры результатов обработки эпизодов пыльных бурь, накопленных в 2005 и 2008 годах, показаны на рисунке 5. Экспертным дешифрированием определены наборы вершин графа, отображающие очаги выноса и его интенсивность (рис. 5а). С помощью алгоритма близкого к алгоритму минимально натянутого дерева построены контуры зон выноса (рис. 5б). Для построения регулярной матрицы, отображающей интенсивность ветровой эрозии (чем выше удельная плотность вершин графа, тем выше предполагаемая интенсивность ветровой эрозии) использовался сложный медианный фильтр. В отсутствие наземной информации не было возможности провести калибровку спутниковых данных, поэтому результаты представлены в относительных единицах интенсивности (рис. 5в).

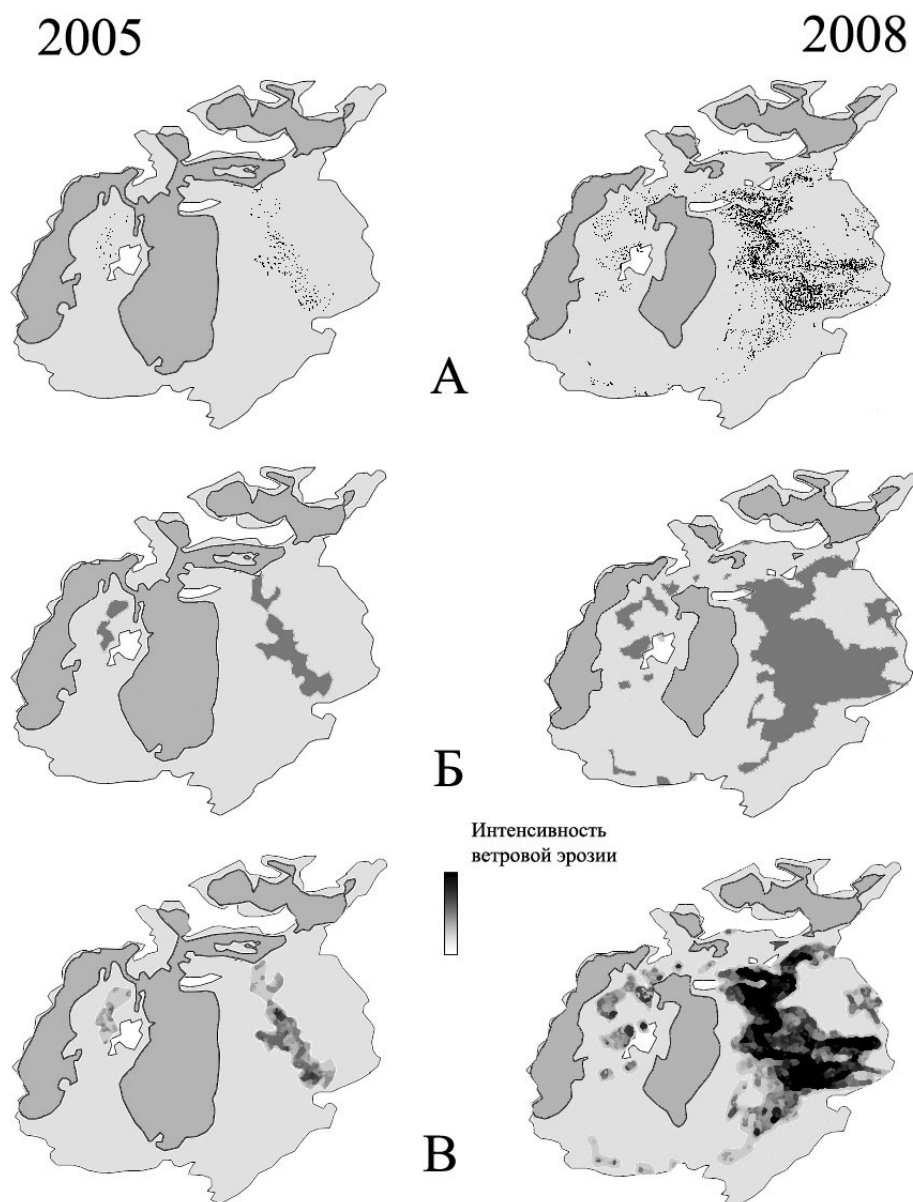


Рис. 5. Результаты спутникового мониторинга пыльных бурь с осушенного дна Аральского моря 2005 и 2008 годов: А – экспертная оценка интенсивности пыльных бурь на спутниковых сценах; Б – контуры зон солепылевого выноса (состояние водного зеркала дано по спутниковым данным на май рассматриваемого года); В – интенсивность процесса солепылевого выноса (усреднено за год)

Исследование пространственных и частотных вариаций характеристик очагов пыльных бурь с осушенного дна Аральского моря

Результаты обработки спутниковой информации показывают существенные различия в частоте и масштабе пыльных бурь от года к году, хотя и наблюдается монотонное ежегодное увеличение активности процессов переноса. Очевидно, что процесс выноса солепылевых аэрозольных частиц с осушенного дна Аральского моря является результатом двух независимых явлений:

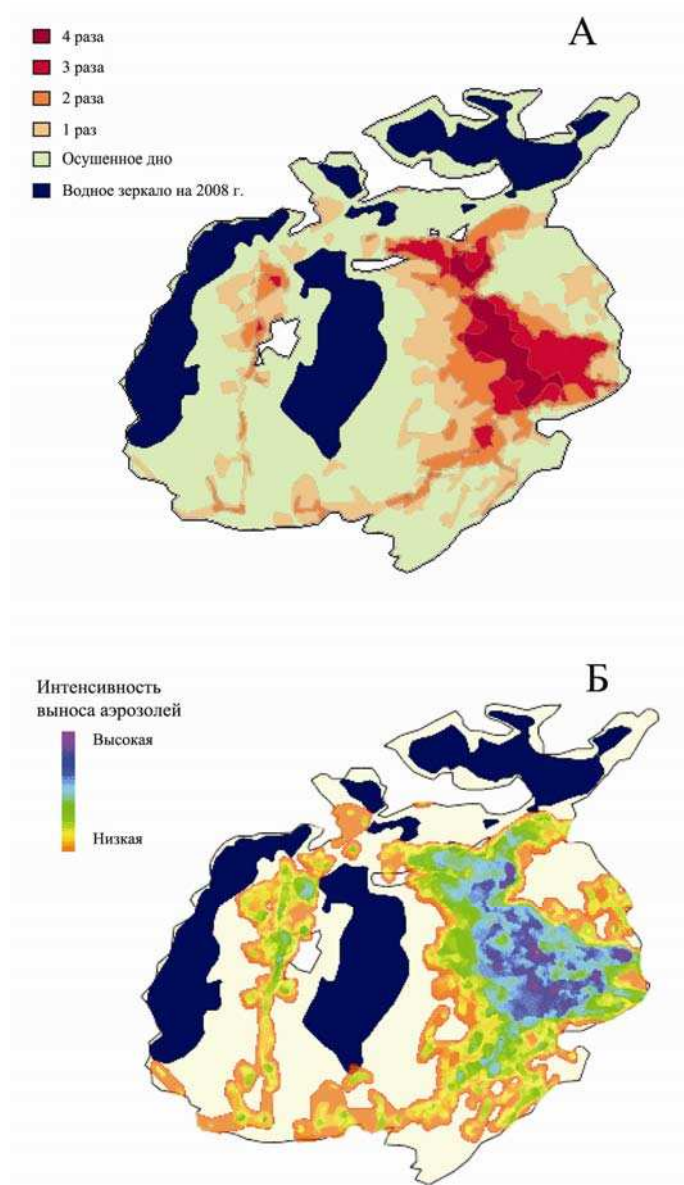


Рис. 6. Пространственные характеристики зон солепылевого выноса с осушенного дна Аральского моря в период 2005-2008 гг. А – частота попадания территории в зону солепылевого выноса при анализе годовых выборок за период 2005-2008 гг.

Б – Интенсивность процесса солепылевого выноса, усредненная за период 2005-2008 гг.

выноса. Потенциально все осушенное дно Аральского моря может стать зоной солепылевого выноса. Исключениями являются территории, имеющие поддержку в увлажнении поверхности почвы за счет фильтрационных или подземных вод. К ним относятся зоны, примыкающие к существующему водному зеркалу Малого Арала, Большого Арала, а также дельтам рек Сыр-Дарья и Амударья, как показано на рисунке 7. Дельты впадающих в Арал рек и зеркало Малого Арала достаточно стабильны. Изменения в территории зоны солепылевого выноса происходит, в основном, за счет уменьшения фильтрационной поддержки со стороны Восточного Арала.

- прогрессивного высыхания бывшего дна с образованием все большей территории с неустойчивой поверхностью;

- метеоусловий в этом регионе, в частности, ветровой обстановки. Ветровая обстановка, как любой метеорологический параметр, не является стабильной величиной и варьируется год от года.

Были проведены многолетние оценки, включающие весь период наблюдений (2005-2008 гг.). Рисунок ба иллюстрирует частоту ежегодной регистрации возникновения пыльных бурь на осушенном дне Аральского моря. На рисунке бб показана средняя интенсивность ветровой эрозии. С точки зрения объективности обработки спутниковой информации, контуры зоны выноса (рис. ба) значительно более достоверны, чем оценка интенсивности ветровой эрозии (рис. бб), в расчет которой включается большое количество субъективной информации. Тем не менее, полученные результаты близки, что указывает на эффективность обеих методик и отражение ими объективной реальности.

Уменьшение водного зеркала в Восточном Арале в период 2005-2008 годов сопровождалось осушением все большей территории бывшего дна. Этот процесс однозначно должен приводить к увеличению площади земель с неустойчивой поверхностью, подверженной ветровой эрозии.

Сезонные синоптические особенности, в основном, влияют на интенсивность ветровой эрозии, и в меньшей степени на конфигурацию зон

- Малый Арал;
- Большой Арал;
- Дельта р. Сырдарья;
- Дельта р. Амударья;
- Водное зеркало 2005

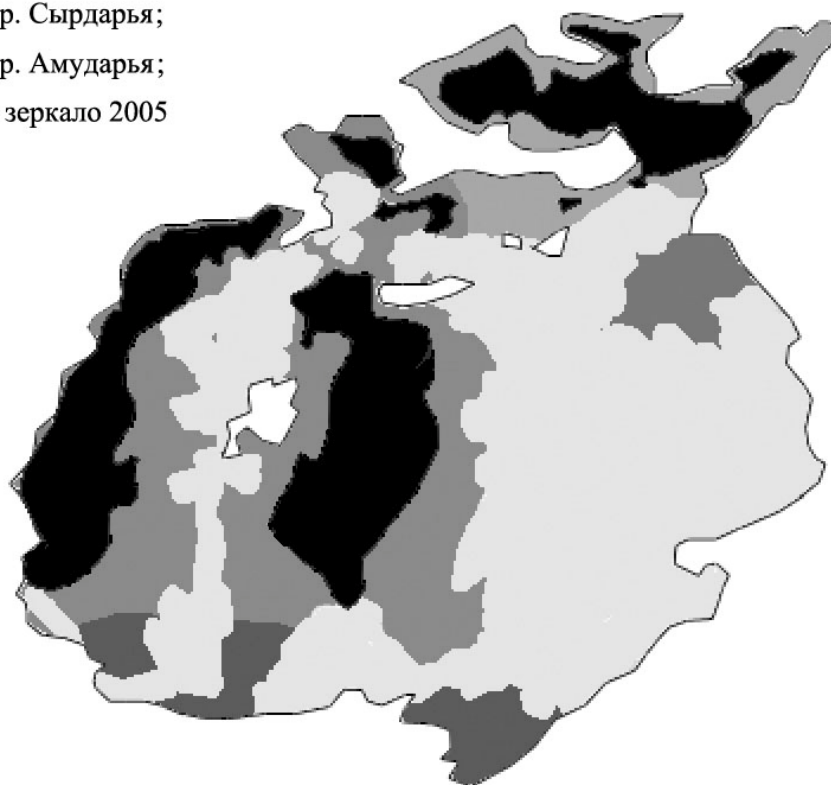


Рис. 7. Зоны поддержки грунтовыми водами поверхности осушенного дна Аральского моря по состоянию на 2008 год по спутниковым данным

На рисунке 8 показаны изменения западной границы зоны солепылевого выноса, примыкающей с восточной стороны к Большому Аралу и являющейся наиболее динамичным очагом бурь, изменение площади которого неизбежно при изменении водного зеркала Восточного Арала. Наблюдается зависимость между сокращением водного зеркала восточной части Большого Арала и увеличением площади зоны солепылевого выноса. При этом части осушенного дна, представляющие собой очаги бурь в предыдущие годы, продолжают активно действовать и в последующее время.

Существующая динамика деградации Восточного Арала делает возможным его полное исчезновение в ближайшем будущем. В этом случае следует ожидать увеличения очага солепылевого выноса и включения в него территории, занятой в настоящий момент Восточным Аралом. На рисунке 9 представлена диаграмма изменения площади зоны солепылевого выноса с осушенного дна Аральского моря в период 2005-2008 и ее прогнозная величина на 2016 год.

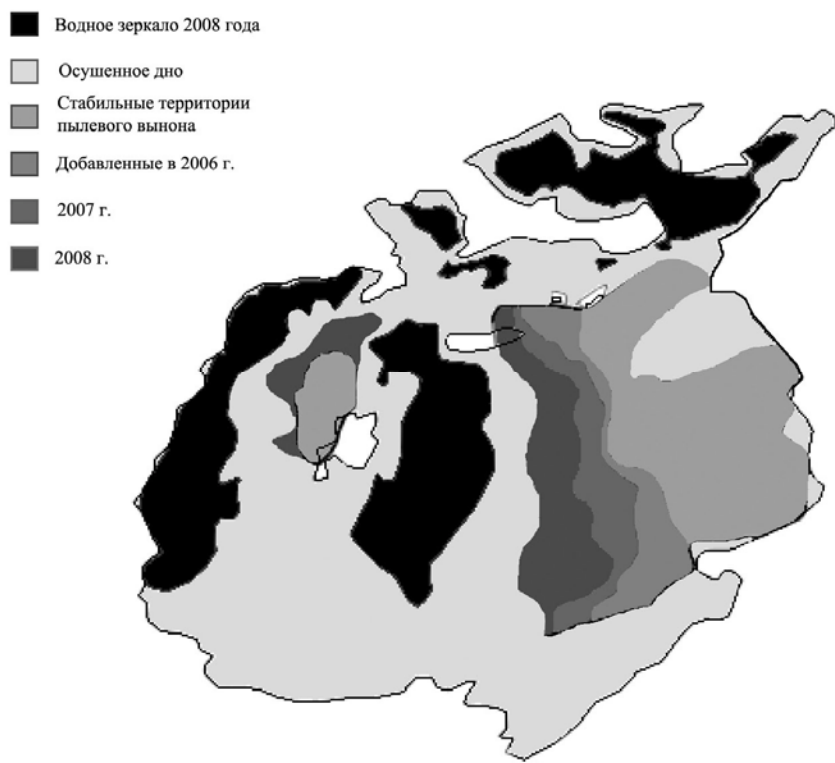


Рис. 8. Динамика пространственного расположения зон солепылевого выноса с осушенного дна Аральского моря в период 2005-2008 гг.

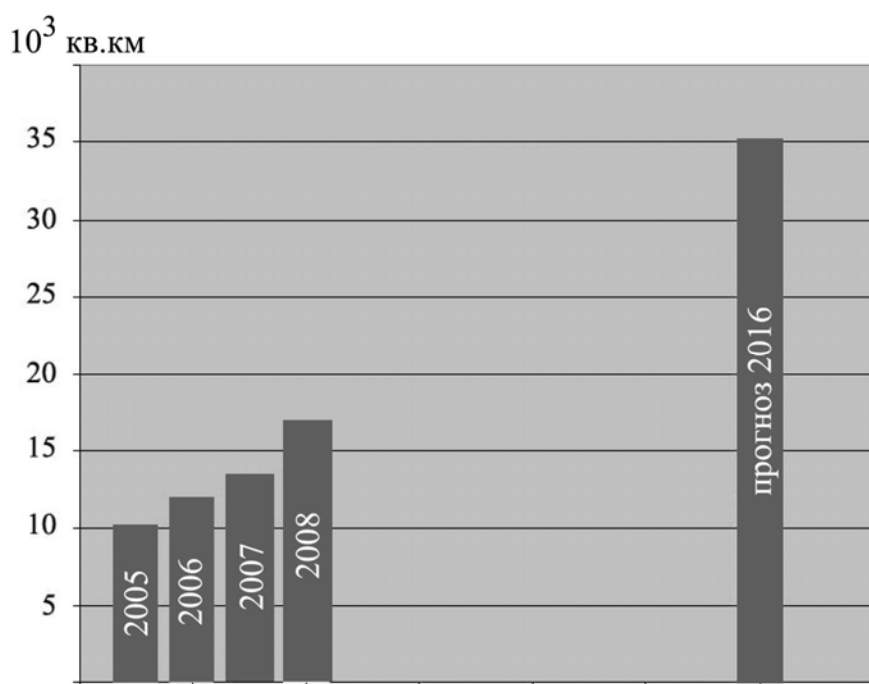


Рис. 9. Изменение площади зоны солепылевого выноса с осушенного дна моря за период 2005-2008 гг. и прогноз ее состояния в случае полного высыхания восточной части Большого Арала

Заключение

Разработана методика анализа спутниковых данных NOAA/AVHRR в задаче мониторинга зон солепылевого выноса с осушенного дна Аральского моря.

Полученные результаты анализа спутниковых данных в период 2005-2008 гг. указывают, что вся территория дна Аральского моря является потенциальной зоной солепылевых выносов. Исключение составляют зоны, подверженные влиянию (за счет фильтрационных и подземных вод) существующих стабильных водных источников: водного зеркала Малого Арала, дельт рек Сыр-Дарья и Амударья. В течение 4 последних лет наблюдается интенсивное увеличение площади очага выноса, что связано с деградацией Большого Арала. Определены возможные границы зоны выноса в предположении полного исчезновения восточной (мелководной) части Большого Арала.

Работа выполнена в рамках проекта республиканской бюджетной программы по фундаментальным исследованиям «Развить математические методы моделирования динамических природно-техногенных процессов с использованием космических технологий» за 2006-2008 гг. Республики Казахстан и INCO Proposal PL-516721 «Long Term Ecological Research Program for Monitoring Aeolian Soil Erosion in Central Asia» (CALTER).

Литература

1. *Липский В.* Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1988. 200 с.

The analysis of changes of the zone of formation of salt-dust storms from the drained bottom of the Aral Sea with using the long-term satellite data

L.F. Spivak, A.G. Terekhov, I.S. Vitkovskaya, M.J. Baturbaeva

Joint Stock Company National Center Space Research and Technologies, RK

Shevchenko 28, Almaty 050010, Kazakhstan

E-mail: ivs-iki@rambler.ru

The original technique of identification of the active salt-dust storms center in east part of the drained bottom of Aral sea is described. Dynamics of change of the area of this zone for period 2005-2008 with the forecast of probable development of a situation in the given region is analysed.

Keywords: remote sensing, the Aral Sea, salt-dust storms, the zone of formation, analysis.