УДК 551.4 (575.172) https://doi.org/10.5281/zenodo.18028802

Арушанов М.Л.[1], Тлеумуратова Б.С.[2]

[1]Научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Ташкент, Узбекистан
[2]Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук,
Нукус, Узбекистан

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА ПЫЛЬНОЙ БУРИ С ИСТОЧНИКОМ НА ОБСОХШЕМ ДНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

Аннотация. *Усыхание Аральского моря вызвано антропогенным фактором забора воды из питающих его рек Амударьи и Сырдарьи, а также интенсивным испарением в связи с глобальным положительным трендом температуры воздуха. В результате на месте обсохшей части Аральского моря образовалась самая молодая пустыня Аралкум – дополнительный источник пыльных бурь в аридном регионе. В статье рассмотрены методологические аспекты разработки автоматизированной системы диагноза и прогноза возникновения и распространения пылевых бурь с заданным географическим положением источника. В основе разработки указанной системы лежат уравнения математической физики, описывающие интенсивность и перенос пыльной бури, диффузии и турбулентности с заданными краевыми условиями с учётом рельефа исследуемой территории. В качестве входных данных используются данные с метеорологических станций, данные спутниковой информации в виде изображений пыльных бурь и цифровой информации о количестве аэрозольного загрязнителя атмосферы.*

Ключевые слова: *пыльная буря, обсохшее дно Аральского моря, уравнения математической физики, цифровая модель рельефа, спутниковые данные.*

Arushanov M.L.[1], Tleumuratova B.S.[2]

[1]Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan
[2]Karakalpakstan Research Institute of Natural Sciences, Nukus, Uzbekistan

METHODOLOGICAL ASPECTS OF DEVELOPING AN AUTOMATED SYSTEM FOR DIAGNOSIS AND FORECASTING A DUST STORM WITH A SOURCE ON THE DRY BED OF THE ARAL SEA

Abstract. *The drying up of the Aral Sea is caused by anthropogenic water abstraction from the Amu Darya and Syr Darya rivers that feed it, as well as intense evaporation due to the global positive air temperature trend. As a result, the youngest desert, Aralkum, has formed in the place of the dried-up part of the Aral Sea, an additional source of dust storms in the arid region. This article examines the methodological aspects of developing an automated system for diagnosing and forecasting the occurrence and propagation of dust storms, given the geographic location of the source. The development of this system is based on equations of mathematical physics describing the intensity and transport of dust storms, diffusion, and turbulence with specified boundary conditions, taking into account the topography of the study area. The input data includes data from meteorological stations, satellite images of dust storms, and digital information on the amount of aerosol pollutants in the atmosphere.*

Key words: *dust storm, dried Aral Seabed, equations of mathematical physics, digital elevation model, satellite data.*

Введение и постановка проблемы. Пыльно-песчаная буря – одно из атмосферных явлений, относящихся к разряду опасных явлений. Проявляется в виде переноса ветром с земной поверхности на различные расстояния большого количества пыли (частиц почвы, песчинок, аэрозоля), вплоть до десятков тысяч километров. В связи с усыханием Аральского моря и образованием на его высохшем дне самой молодой пустыни Аралкум в Среднеазиатском регионе появился новый источник пыльно-соле-песчаных бурь. В результате интенсивность естественного загрязнения атмосферы аэрозолем в этом регионе возросла в разы. Например, г. Ташкент с его многочисленной растительностью стал одним из наиболее загрязнённых городов мира, где к естественным факторам загрязнения добавляются антропогенные, из которых 63 % приходится на транспортные средства [7].

Негативные последствия пыльных бурь, прежде всего, связаны со здоровьем человека, вызывая респираторные и сердечно-сосудистые заболевания. Кроме того, пыльные бури могут переносить различные загрязнители, включая бактерии, вирусы, грибки, пестициды и тяжелые металлы, что усугубляет их вредное воздействие на человека.

Пыльные бури, воздействуя на промышленные объекты, наносят им значительный ущерб, вызывая абразивный износ оборудования, выводят из строя чувствительные приборы, системы вентиляции, из-за загрязнения и снижения видимости значительно понижают эффективность работы. В целом создают дополнительные экологические риски.

Своевременное предупреждение о возможности прохождения пыльной бури в значительной степени позволит сгладить её негативные последствия.

Таким образом, разработка автоматизированной системы диагноза и прогноза пыльной бури в связи с социально-экономическими последствиями её воздействия представляется весьма актуальной. Эта актуальность в значительной мере возрастает для территорий с аридным климатом, каковой является территория Средней Азии, в частности, территория Узбекистана с образовавшимся дополнительным источником пыльных бурь на обсохшем дне Аральского моря.

Изученность вопроса. Исследованию динамики и распространению пыльных бурь посвящено множество работ, касаемо различных географических регионов планеты. Рассмотрим некоторые из этих работ, по нашему мнению, наиболее актуальных с точки зрения методов их решения.

В работе [19] анализируется перенос и причины выбросов песчано-солевых частиц в оперативной модели прогноза пыли, разработанной Китайским метеорологическим управлением. Данные за 18 лет, используемые в прогностической модели пылевых выбросов в рамках программы «Окружающая среда – пыль», позволили сделать выводы о процессах опустынивания в районах Узбекистана, Туркменистана и Южного Казахстана, где расположены пустыни Кызылкум, Каракум и Аралкум, а также в китайских пустынях Онцин-Дага, Му-Ус и Гурбантунгут. Выполненные в работе [19] количественные оценки концентрации пылевой массы, распределения размеров пыльной бури, показали достаточно высокую точность работы модели.

Авторами работы [15] рассмотрены вопросы оценки переноса пыльных бурь с территории пустыни Аралкум. В работе использована численная модель переноса пыли, выполнена оценка переносимой массы тяжёлых частиц, что позволило, в свою очередь, получить количественные оценки вклада песчано-солевых бурь в осаждение пылевого аэрозоля по мере удаления от источника.

В диссертационной работе [3] А.В. Волкова выполнен расчёт дальности переноса пыли и характерных величин запыленности воздуха. Вынос пыли I [мг/м^{2}с], как функция разности наблюдаемой и критической скоростей воздушного потока, интенсивность выноса пыли с элемента поверхности определялась по формуле:

$$I = a \times exp[b \times (V - V_{кр})],$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от диаметра частиц выносимой пыли d_a, мм; $V_{кр} = (0{,}0082 \times d \times d_a + 0{,}055 \times (d_a)^{-2})^{0,5}$ – критическая скорость воздушного потока, м/с; V – текущая скорость ветра, м/с; d – плотность частиц, г/см^3.

Для оценки дальности распространения пыли от её источника удельной мощностью I в работе [4] использовалась зависимость:

$$q = (I \times h) / (V \times L),$$

где q – запыленность воздуха в зоне влияния источника, мг/м^3; I – мощность источника, h – характерная высота источника, м; V – скорость ветра, м/с; L – расстояние, м.

Группой учёных из Казахстана разработана методика оценки переноса массы песчано-солевых частиц с осушенного дна Аральского моря с использованием данных спутниковой информации [8,9]. Сопутствующие переносу пыльной бури метеорологические параметры (давление, скорость ветра, динамическая скорость) вычислялись по мезомасштабной гидродинамической модели *WRF* (*Weather Research and Forecasting Model).* Распределение частиц по размерам задавалось априори логарифмической нормальной функцией с заданными средними размерами. На примере пыльных бурь 7 мая 2007 г. и 28-29 апреля 2008 г. рассчитаны вертикальные профили твердого расхода в приземном слое атмосферы до высоты 170 м, общий расход массы в этом слое и в пограничном слое атмосферы.

В работе [8] последовательно рассматривается динамика Аральского кризиса, его причины и официальная констатация Аральской катастрофы мировым сообществом. Вместе с вопросами динамики природной среды, эколого-географических прогнозов, мониторинга, вклада антропогенной составляющей в процессы усыхания Аральского моря, рассматривались практические меры по сдерживанию процессов опустынивания на территории высохшего дна Аральского моря.

Работа [9], являющаяся продолжением исследований, начатых в работе [8], посвящена решению конкретных задач по изменению климатических параметров на территории Приаралья и оценка их современного состояния. Констатируется, что динамика температуры воздуха по данным наблюдений метеостанций, расположенных на бывшем побережье Аральского моря и островах, приблизилась к значениям на пустынных станциях. Делается вывод, что период изменения климата в Приаралье, обусловленный усыханием Аральского моря, подошёл к завершению. С этим выводом трудно согласиться, а точнее говоря, он просто неправильный. Выравнивание температуры воздуха на территории молодой пустыни Аралкум и приближение её к значениям на других пустынных станциях вовсе не означает, что климатические изменения, вызванные усыханием Аральского моря, прекратились. Указанный факт (выравнивание температуры) показывает, что локальная климатическая система перешла в новое, более экстремальное состояние. Последствия усыхания Арала, такие как опустынивание, засоление почв, повышение скорости ветра, а вместе с тем, усиление интенсивности и частоты пыльных бурь, развиваются с новой силой. Исчезновение огромной массы акватории Аральского моря изменило содержание влаги в регионе, которая до высыхания моря регулировала (сглаживала) воздействие на колебания температуры. Значительное уменьшение влаги привело к увеличению суточных и сезонных температурных амплитуд, что характерно для пустынных районов. Это естественный результат и, как следствие, образование самой молодой пустыни Аралкум, ставшей одним из главных источников песчано-солевых пыльных бурь в Среднеазиатском регионе.

Весьма любопытная модель песчаного локального и перемещающегося на большие расстояния (песчаные цунами) вихря предложена в работе [18]. Независимо от

масштаба вихря, будь то вертикальный столб пыли или песчаные цунами*, причиной их возникновения принято считать разнообразные атмосферные явления, такие как сильный ветер, разогрев атмосферы и пр. В цитируемой работе рассматривается модель вихря, в основе которой, по мнению автора, лежит ответ на вопрос об источнике энергии, поддерживающей форму вихря и его движение, что необъяснимо с позиций механистических атмосферных процессов. В пользу данного утверждения автор приводит факт существование вихрей на планете Марс, где атмосфера отсутствует, точнее сильно разряжённая. Автором работы [18] показано, что источником энергии для песчаного вихря является энергия гравитационного поля. Обоснование данной гипотезы базируется на построение математической модели песчаного вихря с помощью максвеллоподобных уравнений гравитации. В результате, как считает автор, находят физическое толкование такие необъяснённые с позиций атмосферного явления свойства вихря, как движения вихря в целом и сохранение его формы. Здесь возникает ряд вопросов, связанных с корректностью построения математической модели песчаного вихря по аналогии с вихревыми (индуцированными или массовыми) токами, возникающими в проводнике при изменении магнитного поля. Утверждение о том, что гравитирующее тело расходует свою энергию на создание и поддержание массовых токов, противоречит общей теории относительности, а именно, в гравитационном поле тело (песчинка) не тратит энергию на создание массовых потоков, но его гравитация влияет на уже существующие или возникающие потоки энергии или материи. Тем не менее, исходя из того, что не существует абсолютно точных теорий, невзирая на выдающуюся личность Эйнштейна, математическая модель песчаного вихря на основе максвелловских уравнений гравитации представляет собой новый подход к изучению гравитационных полей и их динамических процессов. Она позволяет рассматривать песчаные вихри как проявления гравитационной динамики, схожей с электромагнитными процессами, что, пока только на теоретическом уровне, вполне вероятно, поможет выявлению новых особенностей физики образования и переноса вихреобразных явлений в атмосфере.

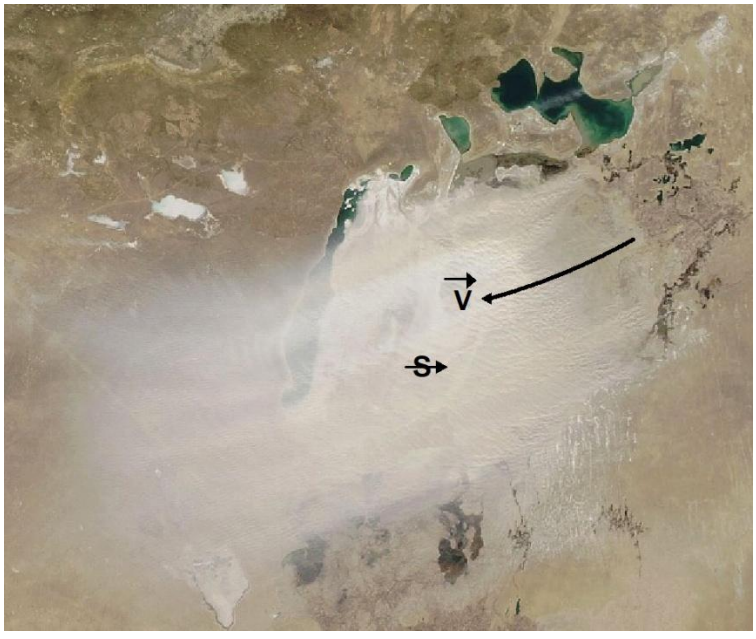


Рис. 1. Пыльная буря над Аральским морем, вызванная сильным ветром восточного румба. Снимок MODIS 24.03.2020 г.

* Песчаное цунами – явление, при котором песок или пыль поднимается в атмосферу из-за сильного ветра или других причин и образует огромное облако.

Над Аральским морем западный перенос в атмосфере является преобладающим [2, 6]. При ветрах же восточных румбов пыльные бури (рис. 1) выносят большое количество осаждающихся частиц песка и соли в море, что стимулирует интенсивное развитие фитопланктона (*fertilization*) – «оплодотворение» моря пылью из пустынь [24]. Таким образом, помимо подавляющего негативного воздействия пыльной бури на окружающую среду, имеет место и её позитивная составляющая.

Кроме того, сильные продолжительные ветры, дующие с суши на море параллельно его берегу или около этого, вызывают прибрежный апвеллинг – глубинный подъём холодных вод [1], что приводит в результате теплообмена к понижению температуры воздуха.

В работе [25] исследовалась поверхность Аральского моря по спутниковым данным *TERRA, AKVA и NOAA* в инфракрасном диапазоне длин волн. Было установлено, что в весенний период при устойчивой термической стратификации, способствующей прогреву приповерхностного слоя, наблюдается апвеллинг в западной части Аральского моря. Аналогичные и не менее яркие проявления апвеллинга были зафиксированы весной у восточного берега западной части Арала и его последующее распространение в направлении противоположного берега. Следует отметить, что явление апвеллинга в Аральском море не учитывается в работах климатологов, посвященных исследованиям динамики климата данного региона.

Весьма обстоятельные исследования были выполнены в работе [13], в которой построена математическая модель прогноза распространения пыле-соляных (токсичных) частиц в пограничном слое атмосферы. Модель включает такие переменные, как скорость потока, коэффициенты трёхмерной диффузии (функция температуры и временного интервала), скорости переноса и размер частиц. Весьма важным в модели является учёт зависимости диффузии от температуры воздуха и скорости ветра, установленная ранее в работах [20, 21, 25].

Особое направление в исследованиях учёных метеорологов занимает редкое явление дождя и снегопада с пылью. Так, в работе [22] исследовалось данное явление с фиксацией по спутниковым изображениям пылевой массы с высоким значением аэрозольной оптической толщины ($AOD \geq 1$), наблюдавшейся одновременно на востоке Ирака, в Сирии, а также на западе и юго-западе Ирана 19 и 20 января 2018 года, впоследствии вызвавшее экстремальное падение температуры. Причиной этого феноменального явления с пыльной бурей дождём и снегом в прифронтальной области явился окклюдированный фронт.

В заключении данного обзора по методам диагностики и прогнозу образования и распространения песчано-пылевых бурь отметим, что в рамках ООН выполнялся проект «*Региональные подходы в борьбе с песчаными и пыльными бурями и засухой в Центральной Азии*» [16], реализованный Региональным Экологическим центром Центральной Азии (РЭЦЦА).

Цель и задачи работы. В данной статье рассматривается методологический аспект разработки автоматизированной системы диагноза и прогноза образования и распространения пыльной бури (АСДПБ) от источника на обсохшем дне Аральского моря по данным метеорологических станций на территории Узбекистана о текущих значениях метеорологических величин (давление, температура, влажность, скорость и направление ветра, информация о типе синоптического процесса), спутниковых изображений и спутниковых данных о количестве аэрозолей и аэрозольной оптической толщине

Методологический аспект построения АСДПБ включает решения следующих задач:

- физические условия возникновения пыльных бурь и их переноса. Математическое описание модели;

- создание базы данных пыльных бурь с источником на осушённом дне Аральского моря и соответствующего им типа синоптических процессов;
- географическое распространение пыльных бурь от источника на осушённом дне Аральского моря по территории Узбекистана;
- исследование метеорологических факторов, способствующих возникновению пыльных бурь (сильные ветры, интенсивность турбулентности, сухость воздуха, фронтальные, циклонические и антициклонические процессы, стратификация атмосферы);
- исследование траектории переноса пыльной бури, как функции типа синоптических процессов;
- разработка математической модели пыльной бури, её интенсивности (дальность видимости), прогноза возникновения и траектории переноса;
- оценка точности модели по ретроспективным наземным и спутниковым данным.

Материалы и методы. База данных АСДПБ необходимо должна включать даты с пыльными бурями с источником в пустыне Аралкум, информацию о временных рядах, соответствующую датам пыльных бурь, о значениях метеорологических величин, типах синоптических процессов, сопутствующих возникновению пыльной бури, данные спутниковой информации в виде изображений среднего (MODIS) и малого (NOAA) разрешения, спутниковые данные (MODIS, CALIPSO) о аэрозольной оптической толщине (AOT), его вертикальный профиль.

Построение АСДПБ должно базироваться на использовании методов уравнений математической физики в построении системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику пыльной бури, с краевыми условиями в совокупности с использованием инструментария ГИС-технологий.

Результаты и их обсуждение. *Физические условия возникновения пыльных бурь и их переноса. Математическое описание.* Пыльные бури возникают при определённых метеорологических и физико-географических условиях. Эти условия обязательным образом включают три ключевых фактора – сухую почву (источник пыли), скорость ветра, превышающая 8 м/с и турбулентность атмосферы (неустойчивая стратификация), обеспечивающая перенос пыли на большие расстояния [16]. В регионах с аридным климатом, ярким примером которого является территория Центральной Азии, к вышеперечисленным условиям можно добавить высокую частоту появления атмосферной засухи. При отсутствии осадков при прохождении фронтов, а также во время грозовой деятельности, в течение которой сильные нисходящие потоки воздуха поднимают пыль с поверхности, могут также образовываться пыльные бури.

На планете Земля источники пыльных бурь занимают общую площадь около 7892663 км^2, что составляет 5% от общей площади суши планеты (рис. 2). Территория высушенного дна Аральского моря – объект с идеальными физико-географическими условиями для образования пыле-соле-песчаных бурь.

Одним из главных физических факторов вместе с сильным ветром, вызывающим пыльную бурю, является турбулентность. Возникающие при турбулентности вихри на территории с сухой рыхлой почвой отрывают частицы от поверхности. Как следствие, при неустойчивой стратификации атмосферы, способствующей возникновению значительной турбулентности, происходит вертикальное перемешивание воздуха. В результате частицы пыли, песка и соли поднимаются на большую высоту и переносятся потоком на значительные расстояния. Благодаря турбулентным потокам частицы пыли могут оставаться в атмосфере в течение длительного времени.

При наличии грозового облака нисходящий поток холодного воздуха, вытекающий из облака, в приземном слое атмосферы вызывает сильные порывы ветра (шквальный ворот) и при отсутствии осадков при грозе поднимает пыль в воздух. Это явление не может быть долгим, поэтому создаваемая при грозе пыльная буря

кратковременна, и в контексте данной статьи этот механизм образования пыльной бури не рассматривается.

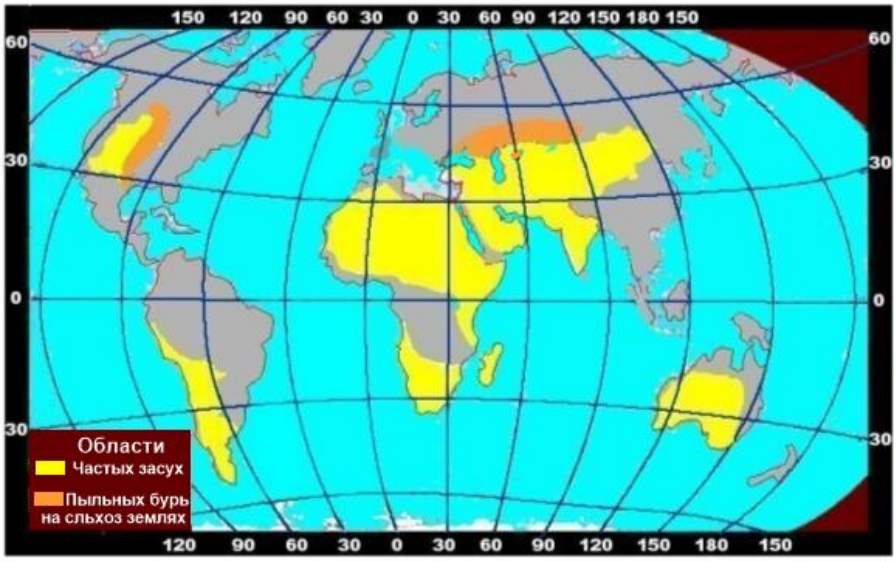


Рис. 2. Географическое распределение потенциально возможного возникновения пыльных бурь на планете (1994 г.) [https://ecosystema.ru/07referats/slovgeo/700.htm].

Примечание: пустыня Аралкум выделена авторами.

Дальность и направление распространения пыльный бури, помимо интенсивности скорости ветра и розы ветров, зависит от рельефа местности. Последний изменяет силу и направление ветра, выступает в качестве барьера перемещения пыльной бури при данном направлении ветра, или, наоборот, ускорителя для воздушных потоков. Горный и достаточно высокий холмистый рельеф являются естественным препятствием распространения пыльной бури. Возвышенности останавливают либо значительно ослабляют распространение пыльной бури, не позволяя ей распространяться на подветренную сторону.

Процесс обтекания холмов и гор частицами пыльной бури вызывает образование дополнительной турбулентности и диффузии – турбулентных вихрей, изменяющих динамику перемещения пыльных частиц. Кроме того, наталкиваясь на возвышенность, воздушные массы изменяют первоначальное направление движения.

В гористой местности, узкие долины и ущелья, выступающие в роли естественных каналов, в отличие от возвышенностей, усиливают скорость распространения пыльных частиц, увеличивая дальность их распространения.

Напротив, на равнинной местности (открытых территориях) в отсутствие естественных препятствий, пыльные бури распространяются по территории на расстояния от сотни до тысячи километров, охватывающие большие площади.

На рис. 3 приведена цифровая модель рельефа местности территории Узбекистана, построенная с шагом географической сетки $0{,}5^{o}\times0{,}5^{o}$. Как следует из рисунка, большая часть территории является равнинной до 66^{o} в.д., исключая холмистую территорию в Навоийской области. Таким образом, пыльная буря с источником на осушённом дне Аральского моря может беспрепятственно распространяться по территории Узбекистана в восточном направлении на расстояния до 510 км, в юго-восточном – до 820 км, в южном – до 885 км, в юго-западном – до 515 км и в западном – до 280 км.

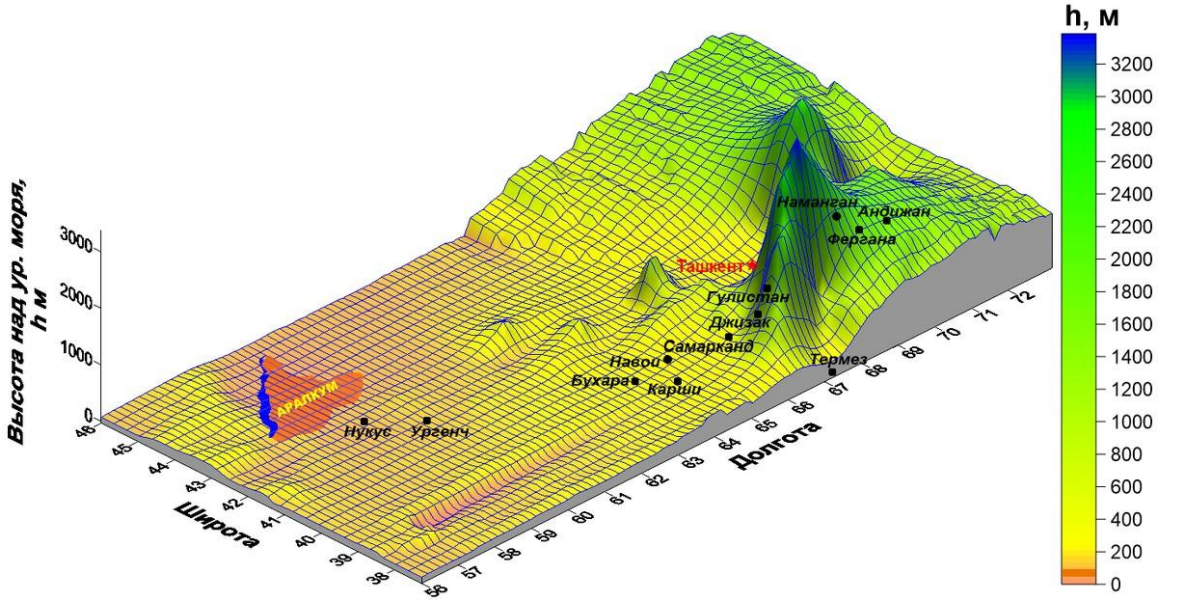


Рис. 3. Цифровая модель рельефа территории Узбекистана

Прогноз пыльной бури в оперативной работе гидрометеорологической службы, базирующейся на автоматизированной системе прогноза, предполагает математическое описание физики её возникновения и переноса, основанное на уравнениях гидродинамики атмосферы [10], уравнениях переноса диффузии примесей и турбулентности атмосферы [4]. Математическая модель включает описание таких процессов, как сальтация – отрыв частиц от поверхности при пороговой скорости ветра $V_{\text{прг}}$ и их перенос потоком ветра (взвешивание).

Движение воздуха описывается уравнением Навье-Стокса, как функции силы давления, вязких сил и силы гравитации. В векторной форме применительно к атмосфере оно имеет вид:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \qquad (1)$$

где $\rho\vec{g}$, Н – сила гравитации ($\vec{g}$ – вектор ускорения свободного падения, м/с^2); ρ – плотность жидкости, кг/м^3; $\vec{v}$ – вектор скорости потока, м/с; t – время, ч; ∇ – оператор набла; $-\nabla p$ – сила градиента давления, Па/м; ∇^2 – оператор Лапласа; член $m\nabla^2 v$ описывает диффузию, при которой вязкие силы стремятся сгладить воздействие турбулентности в потоке, м^2/с; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Связь плотности воздуха с его скоростью движения описывается уравнением неразрывности – закон сохранения массы:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \qquad (2)$$

Отрыв частицы от поверхности почвы происходит при превышении некоторого критического значения скорости ветра – порогового значения, определяемого по формуле [5]

$$u_э = \text{A} \cdot \sqrt{\frac{g d_p (\rho_p - \rho_a)}{\rho_a}}, \qquad (3)$$

где $u_э$ – пороговая скорость ветра, необходимая для отрыва частицы, м/с; A=const – безразмерная величина, характеризующая свойство поверхности; ρ_p – плотность частицы, кг/м^3; ρ_a – плотность воздуха, кг/м^3; d_p – диаметр частицы, м.

Процесс переноса пыли в атмосфере описывается с помощью уравнений диффузии с учётом турбулентности, осаждения и др. [23]. Уравнение переноса-диффузии, описывающее изменение концентрации частиц во времени представляется выражением

$$\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathrm{C}\vec{v}) = \nabla(K\nabla C) + S_{\text{и}} - S_{\text{с}}, \tag{4}$$

где C – концентрация взвешенных частиц, кг/м^3; K – коэффициент диффузии, м^2/с; $S_{\text{н}}$ – источник, кг/(м^3·с); $S_{\text{с}}$ – сток, кг/(м^3·с). В выражении (4) член $\nabla(\mathrm{C}\vec{v})$ – описывает изменение концентрации, вызванное движением потока со скоростью v. Член в правой части $\nabla(K\nabla C)$ определяет изменение концентрации из-за диффузии.

Важно отметить, что коэффициент диффузии прямо пропорционален температуре и обратно пропорционален давлению:

$$K \approx \frac{T^{3/2}}{p \cdot \sqrt{M}}, \tag{5}$$

где T абсолютная температура, K; p – давление, Па; M – молярная масса диффундирующего вещества, кг/моль.

На рис. 4 приведена блок-схема, согласно которой выполняется реализация разработки АСДПБ.

Модуль прогноза пыльной бури (модуль 3 на рис. 4) включает одну из существующих численных гидродинамических моделей прогноза погоды, результаты которых дают входные данные (модуль 1 на рис. 4) для системы уравнений, описывающие прогноз динамики и распространения пыльной бури. В разрабатываемой АСДПБ в качестве гидродинамической модели предполагается использовать негидростатическую гидродинамическую модель COSMO-ICON [14].

Выводы. Необходимость разработки автоматизированной системы диагноза и прогноза пыльных бурь обусловлена, в первую очередь, их значительным влиянием на здоровье населения, а также на экономику и безопасность. Автоматизация позволяет перейти от ручного анализа к оперативному мониторингу в режиме реального времени.

Создание АСДПБ требует обработки огромных массивов данных, включающих спутниковые снимки, наземные метеорологические наблюдения, на основании которых строятся математические модели. Ручной анализ не позволяет осуществлять реализацию необходимых процедур диагноза и прогноза пыльной бури в реальном режиме времени, т.е. оперативного реагирования.

Интеграция ГИС-технологий и современных методов построения математической модели возникновения пыльной бури от заданного источника позволяет не только её диагностировать, но и смоделировать распространение с заблаговременностью до трёх суток.

Таким образом, реализация автоматизированной системы диагноза и прогноза возникновения и распространения пыльной бури с заданным источником должна основываться на модели, построенной на базе гидродинамических уравнений математической физики и с использованием инструментария ГИС-технологий для построения цифровой модели исследуемой территории, учитывающей рельеф местности. Верификация модели выполняется с использованием прошлых данных о пыльных бурях и данных спутниковой информации, представленной в виде изображений пыльной бури и цифровых данных аэрозольной оптической толщины, его вертикального профиля.

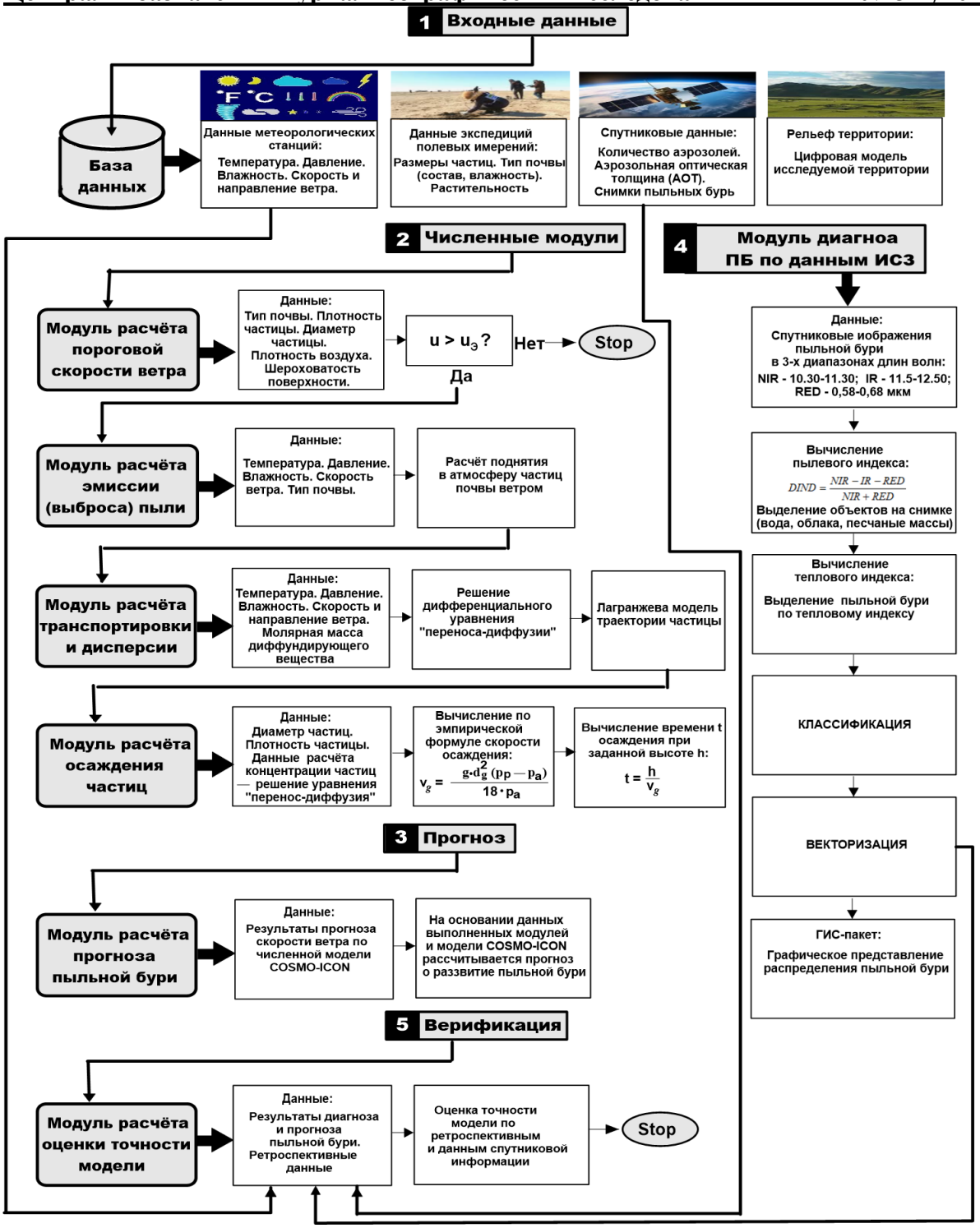


Рис. 4. Блок-схема автоматизированной системы диагноза и прогноза пыльной бури

Развитие таких систем в Центральной Азии рассматривается как приоритетное направление для реализации целей устойчивого развития ООН, главным образом, по снижению смертности от загрязнения воздуха, что является чрезвычайно актуальной задачей. Поэтому методологический аспект её решения имеет важное значение.

Использованная литература:

1. Апвеллинг. Москва: Военное издательство, 1989. 511 с

2. Бугаев В.А., Джорджио В.А., Козик Е.М. и др. Синоптические процессы в Средней Азии. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1957. 477 с.

3. Волков А.В. Методика оценки интенсивности пыления скальных грунтов на основе моделирования естественного процесса образования аэрогеля: дисс. … канд. тех. наук. Тула, 1999. 178 с.

4. Воронцов П.А. Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1966. 296 с.

5. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 240 с.

6. Иногамова С.И., Мухтаров Т.М., Мухтаров Ш.Т. Особенности синоптических процессов Средней Азии. Ташкент: САНИГМИ, 2002. 485 с.

7. Искандаров А.Б. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в Ташкенте // Гигиена и санитария. 2010. № 1. С. 54-56.

8. Каипов И.В., Семенов О.Е., Шапов А.П. Вынос массы алевритового аэрозоля с осушённой части Арала во время пыльной бури 28-29 апреля 2008 года // Гидрометеорология и экология. 2012. №3. С. 49-71.

9. Каипов И.В., Семенов О.Е., Чередниченко А.В., Шапов А.П. Оценка выноса массы алевритовых частиц с осушенного дна Большого Арала с использованием данных дистанционного спутникового зондирования и мезомасштабной гидродинамической модели // Гидрометеорология и экология. 2012. № 1. С. 7-40.

10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Москва: Наука, 1986. 736 с.

11. Новикова Н.М. Эколого-географический аспект Аральского кризиса. Часть 1 // Экология и динамика. 2019. Том 3. № 1. С. 5-66.

12. Новикова Н.М. Эколого-географический аспект Аральского кризиса. Часть 2 // Гидрометеорология и экология. 2020. № 3. С. 96-170.

13. Равшанов Н., Набиева И.С. Математическое моделирование процесса распространения вредных веществ в атмосфере с учётом температуры, физических и химических свойств // Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий. 2024. Т. 7 (4). С. 27-32.

14. Розинкина И.А., Ривин Г.С., Багров А.Н. и др. Конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов β- и γ-мезомасштабных атмосферных процессов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2 (388). С. 6-34.

15. Рафиков В.А., Курбаниязов А.К. Оценка переноса пыле-песчано-солевого материала с обсохшего дна Аральского моря // Экономика и социум. 2025. № 4 (131). С. 1119-1130.

16. Региональные подходы в борьбе с песчаными и пыльными бурями и засухой в Центральной Азии. Ситуационный анализ. Алматы, 2021. 74 с.

17. Селиверстов В.В. Диффузная форма уравнения переноса и метод кинетической диффузии // Атомная энергия. 1999. Т. 86. Вып. 1. С. 16-27.

18. Хмельник С.И. Математическая модель песчаного вихря // Гравитомагнетизм: природные явления, эксперименты, математические модели. Израиль, 2016. С. 38-49.

19. Chunhong Z., Hailin G., Jiangkai H., Huabing K., Yaqiang W., and Xiaoye Z. (2019), Detection of New Dust Sources in Central/East Asia and Their Impact on Simulations of a Severe Sand and Dust Storm, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 10.1029/2019JD030753, September, pp. 1-16. URL: https: //www. researchgate. net/ publication/335312032

20. Djikaev Y.S., Ruckenstein E. (2019), Formation and evolution of aqueous organic aerosols via concurrent condensation and chemical aging, *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 265, pp. 45-67.

21. Kalliat T.V., Franz S.E., Aubrey A., Vaitilingom M. (2021), Mass Transport and Chemistry at the Air–Water Interface of Atmospheric Dispersoids, *Food, Energy, and Water*, pp. 93-109.

22. Karami S., Hamzeh N.H., Alam K., Ranjbar A. (2020), The study of a rare frontal dust storm with snow and rain fall: Model results and ground measurements, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 197, pp. 1-19.

23. Lorenz R.D. (2016), Heuristic estimation of dust devil vortex parameters and trajectories from single-station meteorological observations: Application to InSight at Mars, *Icarus*, vol. 271, pp. 326-337.

24. Meskhidze N., Chameides W.L., Nenes A. (2005), Dust and pollution: a recipe for enhanced ocean fertilization? *Journal of Geophysical research*, vol. 110, D03301, doi: 10.1029/2004jd005082.

25. Sklyarov V.E. (2008), Aral Sea: dust storms and upwelling, *Geophysical Research Abstracts*, vol. 10, EGU2008-A-00000, EGU General Assembly.

References:

1. *Upwelling* (1989), Moscow, 511 p. (In Russ.).

2. Bugayev V.A., Giorgio V.A., Kozik E.M., et al. (1957), *Synoptic Processes in Central Asia*, Tashkent, 477 p. (In Russ.).

3. Volkov A.V. (1999), *Methodology for Estimating the Intensity of Dusting of Rocky Soils Based on Modeling the Natural Process of Aerogel Formation: Diss. ... Cand. tech. sci.*, Tula, 178 p. (In Russ.).

4. Vorontsov P.A. (1966), *Turbulence and vertical currents in the atmospheric boundary layer*, Leningrad, 296 p. (In Russ.).

5. Gendugov V.M., Glazunov G.P. (2007), *Wind erosion of soil and air dustiness,* Moscow, 240 p. (In Russ.).

6. Inogamova S.I., Mukhtarov T.M., Mukhtarov Sh.T. (2002), *Features of synoptic processes in Central Asia*, Tashkent, 485 p. (In Russ.)

7. Iskandarov A.B. (2010), Assessment of atmospheric air pollution in Tashkent, *Hygiene and Sanitation*, No. 1, pp. 54-56. (In Russ.).

8. Kaipov I.V., Semenov O.E., Shapov A.P. (2012), Removal of silt aerosol mass from the dried part of the Aral Sea during the dust storm of April 28–29, 2008, *Hydrometeorology and Ecology*, No. 3, pp. 49-71. (In Russ.).

9. Kaipov I.V., Semenov O.E., Cherednichenko A.V., Shapov A.P. (2012). Estimation of the removal of silt particles from the dried bed of the Greater Aral Sea using satellite remote sensing data and a mesoscale hydrodynamic model, *Hydrometeorology and Ecology*, No. 1, pp. 7-40. (In Russ.).

10. Landau L.D., Lifshits E.M. (1986), *Hydrodynamics,* Moscow, 736 p. (In Russ.).

11. Novikova N.M. (2019), Ecological and geographical aspect of the Aral crisis. Part 1, *Ecology and Dynamics,* Vol. 3, No. 1, pp. 5-66. (In Russ.).

12. Novikova N.M. (2020). Ecological and geographical aspect of the Aral Sea crisis. Part 2, *Hydrometeorology and Ecology*, No. 3, pp. 96-170. (In Russ.).

13. Ravshanov N., Nabieva I.S. (2024), Mathematical modeling of the process of distribution of harmful substances in the atmosphere taking into account temperature, physical and chemical properties, *International Journal of Theoretical and Applied Issues of Digital Technologies*, Vol. 7(4), pp. 27-32. (In Russ.).

14. Rozinkina I.A., Rivin G.S., Bagrov A.N., et al. (2023) Configuration of the COSMO-Ru2By model of the COSMO model: success and methodology for assessing numerical forecasts of β- and γ-mesoscale atmospheric processes, *Hydrometeorological Research and Forecasts*, No. 2 (388), pp. 6-34. (In Russ.).

15. Rafikov V.A., Kurbanyiazov A.K. (2025), Assessment of the transfer of dust-sand-salt material from the dried bottom of the Aral Sea, *Economy and Society*, No. 4 (131), pp. 1119-1130. (In Russ.).

16. *Regional approaches to combating sand and dust storms and drought in Central Asia, Situational analysis* (2021), Almaty, 74 p. (In Russ.).

17. Seliverstov V.V. (1999), Diffuse form of the transport equation and the kinetic diffusion method, *Atomic Energy*, Vol. 86, Issue 1, pp. 16-27. (In Russ.).

18. Khmelnik S.I. (2016), Mathematical model of a sand vortex, *Gravitomagnetism: natural phenomena, experiments, mathematical models*, Israel, pp. 38-49. (In Russ.).

19. Chunhong Z., Hailin G., Jiangkai H., Huabing K., Yaqiang W., and Xiaoye Z. (2019), Detection of New Dust Sources in Central/East Asia and Their Impact on Simulations of a Severe Sand and Dust Storm, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 10.1029/2019JD030753, September, pp. 1-16. URL: https: //www. researchgate. net/ publication/335312032

20. Djikaev Y.S., Ruckenstein E. (2019), Formation and evolution of aqueous organic aerosols via concurrent condensation and chemical aging, Advances in Colloid and Interface Science, vol. 265, pp. 45-67.

21. Kalliat T.V., Franz S.E., Aubrey A., Vaitilingom M. (2021), Mass Transport and Chemistry at the Air–Water Interface of Atmospheric Dispersoids, Food, Energy, and Water, pp. 93-109.

22. Karami S., Hamzeh N.H., Alam K., Ranjbar A. (2020), The study of a rare frontal dust storm with snow and rain fall: Model results and ground measurements, J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 197, pp. 1-19.

23. Lorenz R.D. (2016), Heuristic estimation of dust devil vortex parameters and trajectories from single-station meteorological observations: Application to InSight at Mars, Icarus, vol. 271, pp. 326-337.

24. Meskhidze N., Chameides W.L., Nenes A. (2005), Dust and pollution: a recipe for enhanced ocean fertilization? Journal of Geophysical research, vol. 110, D03301, doi: 10.1029/2004jd005082.

25. Sklyarov V.E. (2008), Aral Sea: dust storms and upwelling, Geophysical Research Abstracts, vol. 10, EGU2008-A-00000, EGU General Assembly.

Сведения об авторах:

Арушанов Михаил Львович – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), доктор географических наук, профессор. E-mail: mikl-arushanov@rambler.ru.

Тлеумуратова Бибигуль Сарыбаевна – Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук (Нукус, Узбекистан), доктор физико-математических наук.

Information about the authors:

Mikhail Arushanov – Research Hydrometeorological Institute (Tashkent, Uzbekistan), Doctor of geographical sciences, Professor. E-mail: mikl-arushanov@rambler.ru.

Bibigul Tleumuratova – Karakalpak Research Institute of Natural Sciences (Nukus, Uzbekistan), Doctor of Physical and Mathematical Sciences.

Для цитирования:

Арушанов М.Л., Тлеумуратова Б.С. Методологические аспекты разработки автоматизированной системы диагноза и прогноза пыльной бури с источником на обсохшем дне Аральского моря // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2025. № 3-4. С. 72-84.

For citation:

Arushanov M.L., Tleumuratova B.S. (2025), Methodological aspects of developing an automated system for diagnosis and forecasting a dust storm with a source on the dry bed of the Aral Sea, *Central Asian Journal of Geographical Researches*, No. 3-4, pp. 72-84. (In Russ.).