*Малиновская Елена Александровна. Аналитическое и численное моделирование процессов на границе атмосфера - поверхность песчаной почвы при ветре : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 05.13.18 / Малиновская Елена Александровна; [Место защиты: Ставроп. гос. ун-т].- Ставрополь, 2008.- 178 с.: ил. РГБ ОД, 61 08-1/584*

Государственное образовательное учреждение высшего Профессионального образования «СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах^рукописи

04200851952

**МАЛИНОВСКАЯ ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ АТМОСФЕРА - ПОВЕРХНОСТЬ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ВЕТРЕ**

05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы

программ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель д-р физ.-мат. наук, проф. Каплан Л.Г.

Ставрополь, 2008

Введение 4

ГЛАВА 1. ФИЗИКА ЯВЛЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЕТРА НА 9 ПОВЕРХНОСТЬ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ЕЕ ЧАСТИЦ

1. [Процессы, возникающие при ветровой эрозии песчаной почвы 9](#bookmark2)
2. Математическое описание движения воздуха на границе с 16 поверхностью земли
3. Существующие уравнения движения частиц поверхности 24
4. Постановка задач и цели исследования 34 ГЛАВА 2. ВЫВОД И ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ 36 ПЕСЧАНОЙ ЧАСТИЦЫ
5. Эксперимент по выдуванию песчаной почвы 36
6. Вывод уравнений движения частиц поверхности под влиянием ветра, 39 определение критериев перехода частиц из одного динамического состояния в другое
7. Применение предложенных уравнений движения к исследованию 66 влияния дополнительных факторов на выдувание почвы
8. Основные результаты, полученные в главе 73 ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА 75 ПОВЕРХНОСТИ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ВЫДУВАНИИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
9. Построение модели поверхностного источника частиц песчаной почвы 75
10. Исследование влияния «острова неоднородности» на характеристики 94 поверхностного источника аэрозоля
11. Построение модели процесса структурирования песчаной почвы при 100 ветровом воздействии
12. Исследование распределения частиц различного размера в атмосфере 109
13. Основные результаты, полученные в главе 115 ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО 117 КОМПЛЕКСА (ПК) ДЛЯ ЦЕЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЕТРА НА СУХУЮ ПЕСЧАНУЮ ПОЧВУ
14. **Структура ПК и его отдельных блоков, основные функции и 117 алгоритмы реализации исследовательских задач в ПК «СаЬугс»**
15. **Применение ПК дня исследования влияния механических факторов на 127 опустынивание и усиление ветровой эрозии**
16. **Применение ПК для исследования формирования структуры брегов 130 малых рек**
17. **Применение ПК для исследования запыления и загрязнения атмосферы 132 при ветровой эрозии**
18. **Основные результаты, полученные в главе 139**

**Заключение 141**

**Литература 143**

**Приложение 1. Свидетельство о государственной регистрации программы 155 для ЭВМ «СаЬугс» и акты о внедрении**

**Приложение 2. Г рафические материалы 161**

**Приложение 3. Табличные данные 170**

**Приложение 4. Элементы листинга ПК «СаЬугс» 172**

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационного исследования. Процессы на границе атмосфера - песчаная почва при ветре: захват, перенос и осаждение песчаных частиц пустыни - весьма важны при исследовании глобальных изменений окружающей среды. Это связано со следующими обстоятельствами:

1. пыль, содержащаяся в атмосфере как аэрозоль, значительно влияет на состояние окружающей среды и условия жизни человечества; 2) для многих стран и регионов является опасным движение пустынь и важно выявление методов регулирования этого наступления.

Изучение воздействия ветра на почву направлено на решение трех задач: выявление механизмов выдувания частиц почвы, объяснение причин структурирования поверхности под влиянием ветра, прогнозирование запыленности приземного слоя атмосферы во время бурь.

Существуют несколько моделей, описывающих движение оторванных ветром частиц поверхности. Так в работах Андерсона С.Р., Халлета Б. и Глазунова Г.П., Гендугова В.М. [34, 56] условие отрыва частицы от поверхности определяется вертикальными составляющими сил, действующих на частицу. В монографии Бютнер Э.К. «Динамика приповерхностного слоя воздуха» [47] отрыв частицы реализуется за счет касательного напряжения при движении ветра у поверхности. Движение частиц на поверхности и критерии перехода между ее динамическими состояниями: от покоя к перемещению на поверхности, от покоя juxh перемещения на поверхности к динамическому движению вне поверхности, математически не описаны, что необходимо в задачах воздействия ветра на почву. Также в предлагаемых моделях не учтено влияние дополнительных к ветру факторов.

Для определения числа отрываемых частиц с поверхности авторы [34, 56] считали, что она состоит из монодисперсных частиц. Слоистая структура песчано-воздушного потока, определяемая сальтацией (подпрыгиванием) частиц поверхности, исследованы в известной монографии Бютнер Э.К. [34]. Согласно теории Баренблатга Г.И. и Голицына Г.С. слоистая структура потока объясняется тем, что оторвавшаяся частица оказывается в турбулизированной среде и за счет турбулентных пульсаций оказывается во взвешенном состоянии. Однако в указанных теориях не учитывается влияние механизмов отрыва на формирование слоистой структуры. Поэтому уяснение механизма формирования слоистой структуры песчано-воздушного потока является актуальным.

Из общих физических соображений ясно, что за счет шероховатости песчаные частицы не меняют позицию около ядра, образованного за счет малых топографических неоднородностей. Это приводит к формированию структур. Однако условия появления этих неоднородностей и структур поверхности не выявлены. Поэтому выяснение механизма формирования структур песчаной поверхности с учетом механизмов отрыва и полидисперсности взаимодействующих между собой частиц является актуальным.

На современном этапе развития разработаны компьютерные программы для исследования распространения аэрозолей в атмосфере и для определения коэффициентов эродируемости почвы (ее подверженности ветровой эрозии). Однако ветровая эрозия, запыление атмосферы и структурирование поверхности - взаимосвязанные процессы, поэтому необходимо комплексное исследование моделей этих процессов, для чего требуется соответствующее программное обеспечение.

Поэтому разработка математической модели процессов на границе атмосфера - песчаная почва с учетом движения частиц на поверхности в приземном слое атмосферы для исследования запыления атмосферы и структурирования поверхности под влиянием ветра и на основе этой модели создание комплекса программ является актуальным.

Цель исследования: разработка математической модели воздействия ветра на песчаную почву для описания механизмов отрыва частиц, формирования песчаных структур, интенсивности выветривания и распространения песчаных частиц в атмосфере и создание на основе этой модели программного комплекса для целей прогнозов запыления атмосферы.

Объект исследования: математическая модель сухой песчаной почвы под влиянием ветра.

Предмет исследования: моделирование воздействия ветра на граничный слой песчаной почвы.

Методы исследования: построение математических моделей, их

исследование и аналитическое решение, применение технологий алгоритмизации и программирования, постановка и проведение вычислительного эксперимента, программно-целевое управление, имитационное моделирование.

**Задачи исследования:**

1. построить уравнение движения песчаных частиц под воздействием воздушного потока, учитывающее помимо скорости ветра процессы выбивания крупными падающими частицами частиц на поверхности, влажность почвы и изменение плотности воздуха; на его основе предложить критерии классификации состояний частиц на поверхности при ветровом воздействии;
2. исследовать характеристики скорости выдувания полидисперсных взаимодействующих при движении на поверхности песчаных частиц под воздействием ветра, распространение пылевых частиц в атмосфере и формирование пылевых слоев;
3. разработать математическую модель процесса структурирования песчаной почвы при ветровом воздействии при различных состояниях системы подстилающая поверхность-атмосфера;
4. разработать ПО, позволяющее моделировать процессы воздействия ветра на почву с целью прогноза ветровой эрозии, структурных изменений и степени запыления воздуха; а также оценить эффективность предложенных метододик прогнозирования, касающихся выдувания песчаной почвы.

**Научная новизна;**

1. на основе полученного уравнения движения песчаной частицы под воздействием воздушного потока предложены критерии классификации состояний частиц (покоя, перекатывания без отрыва, отрыва в результате перекатывания, отрыва без перекатывания); оценено влияние на отрыв частиц следующих факторов: изменение скорости ветра, выбивание крупными падающими частицами частиц на поверхности, наличие в почве влаги, изменение плотности воздуха;
2. исследованы в вычислительном эксперименте свойства процесса выдувания полидисперсных взаимодействующих при перемещении на поверхности песчаных частиц под действием ветра, проведен анализ влияния поверхностной структуры песчаной почвы на изменение числа отрывающихся частиц с учетом и без учета осаждения ранее поднятых частиц;
3. на основе предложенной математической модели структурирования песчаной почвы при ветровом воздействии в вычислительном эксперименте выявлены условия возникновения структур; показано, что условия структурирования поверхности определяются появлением «островов неоднородности» - областей, где сосредоточены частицы устойчивые к воздействию ветра (при «слабом» ветре это неподвижные частицы, при «сильном» ветре это отрывающиеся после перекатывания частицы);
4. разработано ПО с интерфейсом для моделирования процессов воздействия ветра на почву с целью прогноза ветровой эрозии, структурных изменений и степени запыления воздуха.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертационного исследования основывается на использовании известных гидродинамических законов в вычислительных моделях и алгоритмах. Достоверность полученных результатов определялась путем тестирования и проверки соответствия существующим полуэмпирическим моделям и экспериментальным данным.

**Практическая ценность** работы определяется возможностью применения разработанного ПО к следующим задачам: исследование источников пыления, оценка качества почв и скорости их деградации, оценка количества аэрозоля в воздухе при пылении и пыльных бурях, исследование процессов рельефообразования и особенностей отложения частиц в почве при геологическом анализе прошлого Земли.

ПО зарегистрировано в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, оно свободно для распространения и доступно другим пользователям.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. уравнение движения песчаных частиц под воздействием воздушного потока, учитывающее помимо скорости ветра процессы выбивания крупными падающими частицами частиц на поверхности, влажность почвы и изменение плотности воздуха; критерии классификации состояний частиц на поверхности при ветровом воздействии;
2. результаты исследования скорости выдувания полидисперсных взаимодействующих при движении на поверхности песчаных частиц под воздействием ветра, распространения пылевых частиц в атмосфере и формирования пылевых слоев;
3. математическая модель процесса структурирования песчаной почвы при ветровом воздействии при различных состояниях системы подстилающая поверхность-атмосфера;
4. программное обеспечение, позволяющее моделировать процессы воздействия ветра на почву с целью прогноза ветровой эрозии, структурных изменений и степени запыления воздуха; а также оценить эффективность предложенных методик прогнозирования, касающихся выдувания песчаной почвы.

**Апробация работы и публикации.** Результаты исследований доложены:

1. на Международных конференциях:

* «Математика. Компьютер. Образование» (Дубна - Пущено, 2004, 2007 и 2008

**г.),**

* «Проблемы экологической безопасности и сохранение природно-ресурсного потенциала» (администрация КМВ - Ставрополь, ежегодно с 2004 по 2007 г.),
* «Устойчивый мир: на пути к экологически безопасному гражданскому обществу» (Москва, МГУ, 2006 г.),

1. на Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, МГТУ, 2005 и 2007 г.),
2. на научно-методической конференции преподавателей и студентов Ставропольского государственного университета (ежегодно с 2003 по 2007 г.).

По теме диссертации автором опубликовано 20 работ, 3 публикации в журналах перечня ВАК, 15 статей, 4 тезиса докладов и свидетельство о регистрации алгоритмов и программ в «Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам» (г. Москва) и 4 акта о внедрении.

1. Произведенное сравнение расчетных значений численных экспериментов с данными мониторинага показало, что предложенные в настоящей работе модели адекватно отражают реальные процессы.
2. Предложена математическая модель движений частицы поверхности сухой песчаной почвы под действием ветра, описывающая механизмы: начального отрыва частицы, то есть выход из состояния покоя с дальнейшим перекатыванием; полного отрыва частицы от поверхности, когда частица вылетает с поверхности после перекатывания или непосредственно под действием ветра в приповерхностный слой атмосферы без перекатывания. Получены критерии, определяющие переходы: во-первых, от состояния покоя к реализации механизмов начального отрыва и полного отрыва без перекатывания, во-вторых, от механизма начального отрыва к механизму полного отрыва после перекатывания.

Выявлен диапазон плотностей и радиусов частиц, для которого применима предлагаемая модель отрыва.

1. Из предложенной модели для песчаных частиц пустыни получены значения критической скорости ветра, определяющей начальный и полный отрыв частиц разного радиуса. Показано, что полный отрыв при непосредственном поднятии для мелких частиц радиусами 2 • 10~5 < *г <* 8 • 10~5м происходит при скоростях ветра от 8 до 3,5 м/с на высоте 1 м. Полный отрыв после перекатывания для крупных частиц радиусами 8-Ю-5 *<г <* 2,5 • 10"4 м происходит при скоростях ветра от 4,5 до 6,5 м/с на

высоте 1 м. Начальный отрыв крупных частиц радиусами с д

8-10 <г<2,5-10 м возможен и при небольших скоростях ветра 2-5 м/с,

частицы радиусами *г >* 8 ■ 10~5 м поворачиваются относительно точки сцепления

с поверхностью, а при *г <* 8 • 10\_5м они отрываются без поворота.

1. Анализ предложенной модели движения частиц позволил численно оценить влияние на отрыв частицы дополнительных к ветру факторов. При увеличении плотности воздуха в 1,5 раза критическая скорость ветра становиться меньше на 0,01-0,2 м/с на высоте 1м. Влага в почве усиливает действие сил сцепления между частицами на 1-2 порядка по отношению к величине силы тяжести. Поэтому увеличение влажности воздуха приводит к увеличению влажности почвы и уменьшению ветровой эрозии.
2. Предложено математическое описание для расчета интенсивности выветривания полидисперсных, взаимодействующих между собой частиц поверхности песчаной почвы, т.е. число частиц, отрывающихся в единицу

времени с единицы площади поверхности. Установлена аналитическая зависимость увеличения интенсивности выветривания от скорости ветра. В вычислительном эксперименте установлено, что с ростом размеров островов неоднородности уменьшается число отрывающихся частиц с учетом и без учета осаждения ранее поднятых частиц.

1. Показано влияние механизмов отрыва частиц на формирование пылевых слоев песчано-воздушного потока.
2. В вычислительном эксперименте установлены критерии структурирования поверхности, связанного с образованием островов неоднородности. Показано, что при некотором критическом значении скорости ветра поверхность структурируется, так как отрываются не все частицы, а около крупных частиц возникают и укрупняются острова неоднородности. При увеличении скорости ветра на процесс структурирования влияет осаждении ранее поднятых частиц. На основе аппарата теории вероятностей и случайных процессов, предложена математическая модель структурирования поверхности, которая учитывает отдельные перемещения каждой частицы и процессы осыпания при большом локальном угле наклона. Показано, что линия наветренного склона возникшей структуры является фракталом.
3. Для исследования динамических процессов воздействия ветра на сухую песчаную почву разработан программный комплекс «СаЬугс», основанный на предложенных математических моделях процессов выветривания песчаной почвы. Результаты вычислительных экспериментов находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с реальными процессами, что свидетельствует об адекватности предложенных моделей ветровой эрозии и пыления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arimoto, М.О. Eolian dust and climate: relationsliips to sources, tropospheric chemistry, transport and deposition // Earth-Science Reviews 54:29-42,2001.
2. Bagnold, R. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen, London, 1941.
3. Bagnold, R.A. The physics of bloun sand and desert duns. L., 1954,265 p.
4. Bonasoni, P., Cristofanelli, P., Calzolari, F., Bonaf e, U., Evangelisti, F., Stohl, A., van Dingenen, R., Colombo, Т., Balkanski, Y.. Aerosol-ozone correlations during dust transport episodes. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions 4: 2055-2088, 2004.
5. Chepil, W. Influence of moisture of credibility of soil by wind. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 20:288-292, 1956.
6. Com, M. Adhesion of solid particles to solid surface, i: A review. J. Air Pollution Control Assoc, 11(11):523, 1961.
7. David, A. Taylor. Dust in the Wind // Environmental Health Perspectives, №2, February 2002, VOLUME 110.
8. Fouquart, Y.B., Bonnell, G., Brogniez, G., Buriez, J.C., Smith, L., Morcrette, J.J., Cerf, A. Observations of Saharan aerosols: Results of ECLATS field experiment II. Broadband radiative characteristics of the aerosols and vertical radiative flux divergence. Journal of Applied Meteorology, 26:38-52.
9. Fletcher, R.A.. The erosion of dust by an airflow. J. Phys. D: Appl. Phys., 9(17):913- 924, 1987.
10. Geological History: Surface Layer Chemistry. Mars Pathfinder Mission Mineralogy and Geochemistry Science Operations Group // http: // calspace.ucsd.edu/marsnow/libraiy/science/geological\_history/surface\_chemistiyl.html