

Гендугов В.М.
Глазунов Г.П.

**Ветровая эрозия
почвы и
запыление воздуха**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 502.5
ББК 40.30
Г 34

Гендуггов В. М., Глазунов Г. П. **Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 240 с. — ISBN 978-5-9221-0750-1.

Книга посвящена созданию теории ветровой эрозии почвы в рамках механики многофазных сред. В ней содержатся аналитические решения основных задач ветровой эрозии почвы и запыления воздуха: отрыва, подъёма, переноса и отложения твёрдых частиц воздушным потоком, абразии и лавинного эффекта нарастания потока твёрдой фазы с расстоянием, баланса почвенной массы при эрозии, структуры воздушно-почвенного потока.

Предназначена научным работникам и специалистам-практикам, а также аспирантам и студентам, занимающимся изучением взаимодействия движущегося воздуха с почвенно-грунтовой поверхностью.

ISBN 978-5-9221-0750-1

© ФИЗМАТЛИТ, 2007

© В. М. Гендуггов, Г. П. Глазунов, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Основные обозначения и постоянные.	12
Глава 1. Введение	14
Глава 2. Ветровая эрозия почвы — глобальное явление	21
2.1. Качественная картина ветровой эрозии почвы.	21
2.2. История изучения ветровой эрозии почвы	30
2.3. Выбор масштаба моделирования ветровой эрозии почвы.	41
2.4. Экспериментальные методы и районы исследования.	45
2.5. Выводы	51
Глава 3. Движущие силы ветровой эрозии почвы	52
3.1. Природа подъемной силы	52
3.2. Теоретическое и экспериментальное решение задачи о подъемной силе и межагрегатном сцеплении	56
3.3. Межагрегатное сцепление в несвязной почве	62
3.4. Выводы	65
Глава 4. Закон выдувания почвы	66
4.1. Экспериментальный закон выдувания	66
4.2. Аналоги закона выдувания	76
4.3. Нуль-модель ветровой эрозии почвы и ее проверка	77
4.4. Выводы	80
Глава 5. Закономерности движения почвенных частиц и континумов	81
5.1. Движение одиночной частицы	81
5.2. Движение ансамбля почвенных частиц	86
5.3. Модель воздушно-почвенного потока в приближениях механики многофазных сред	91
5.4. Выводы	95
Глава 6. Уравнение потерь почвы с больших территорий	97
6.1. Структура воздушно-почвенного потока при безвозвратном уносе частиц	97

6.2. Структура пылевого облака при механической обработке почвы . .	101
6.3. Структура воздушно-почвенного потока при скачкообразном движении частиц	102
6.4. Исследование модели структуры потока	106
6.5. Баланс ветровой эрозии почвы в условиях неограниченного поля .	111
6.6. Выводы	118
Глава 7. Механизмы ветровой эрозии почвы при наличии границ выдувания	119
7.1. Влияние границ на механизмы эрозии	119
7.2. Уравнение сохранения потока массы над движущейся поверхностью переходного участка	125
7.3. Стадийность единичного явления ветровой эрозии почвы	127
7.4. Динамика потерь почвы с непрерывным распределением частиц по размерам	131
7.5. Выводы	132
Глава 8. Механизмы абразии при ветровой эрозии почвы	134
8.1. Постановка задачи абразии	134
8.2. Удар частицы о поверхность с выбиванием почвенной массы	135
8.3. Потоки массы при самопроизвольно возникающей эрозии с абразией	140
8.4. Экспериментальная проверка теоретического решения задачи абразии	140
8.5. Выводы	145
Глава 9. Лавинный эффект и абразия при переносе почвы ветром	146
9.1. Потеря массы частицами при скачкообразном движении	146
9.2. Суммарный поток массы от почвенной поверхности в атмосферу . .	149
9.3. Экспериментальная проверка модели	152
9.4. Выводы	159
Глава 10. Полномасштабное явление ветровой эрозии почвы	160
10.1. Предпосылки построения полномасштабной модели ветровой эрозии почвы	160
10.2. Простая модель стратифицированной по плотности атмосферы . . .	163
10.3. Движение почвенной частицы в стратифицированной атмосфере . .	166
10.4. Уравнение сохранения потока массы для почвенного континуума в стратифицированной атмосфере	174
10.5. Структура воздушно-почвенного потока в стратифицированной по плотности атмосфере	175
10.6. Стадия аккумуляции	178

10.7. Проверка модели	182
10.8. Выводы	190
Глава 11. Теоретические основы защиты почвы путем увеличения связности	192
11.1. Экспериментальный закон выдувания связной почвы	192
11.2. Оценка эффективности воздействий на почву с целью повышения её устойчивости к выдуванию	198
11.3. Параметризация модели выдувания связной почвы	202
11.4. Теория оструктурирования песчаной почвы кондиционером	209
11.5. Выводы	215
Заключение	216
Литература	217

Предисловие

Работа посвящена исследованию и объяснению самопроизвольного взлёта, подъёма под облака и межконтинентального перелёта биокосных тел, которые тяжелее воздуха, — совокупности природных явлений, составляющих сущность ветровой эрозии почвы.

В первой главе работы приведены материалы, свидетельствующие о глобальных масштабах распространения и вредоносности ветровой эрозии почвы, а также о важной роли сопутствующих ей процессов переноса и отложения почвенных частиц ветром в обеспечении жизнедеятельности ряда крупных экосистем. Выделены основные теоретические и прикладные проблемы эрозиоведения и других дисциплин, предметом которых является ветровая эрозия. Обоснована необходимость разработки теории ветровой эрозии как инструмента углубления исследований и основы практических мер по охране почвы и атмосферного воздуха. Сформулированы цели и задачи исследования, приведено краткое описание содержания работы и полученных результатов. Обосновано создание нового научного направления в почвоведении — механики ветровой эрозии почвы.

Вторая глава посвящена выяснению предмета исследования, обоснованию новых методических подходов и описанию использованных методов. В ней проведен краткий систематизированный обзор состояния исследований по ветровой эрозии почвы в нашей стране и за рубежом. В обзоре очерчены этапы в эволюции научных подходов к решению проблем ветровой эрозии почвы, выявлены нерешенные проблемы и сформулированы задачи первоочередных исследований. На основе анализа новых экспериментальных данных и обобщения существующих представлений дана качественная картина ветровой эрозии почвы, необходимая для количественного описания этого явления на основе методов механики многофазных сред и представлений о многоскоростных континуумах и взаимопроникающем движении компонентов. Обоснована необходимость разномасштабного подхода к исследованию, вытекающая из физики явления — несводимости законов макромира к законам микромира. В механике многофазных сред микромасштаб исследования определяется молекулярно-кинетическими размерами, то есть расстоянием между молекулами, средними длинами свободного пробега и т. п. Соответственно этому макромасштаб определяется размерами, значительно превышающими молекулярно-кинетические и в то же время сильно уступающими расстояниям, на которых макроскопические или осредненные параметры смеси или фаз меняются существенно (вне поверхностей разрыва) [132]. Другими словами, в

макромасштабе рассматривается смесь, в которой размер частиц твердой фазы велик в сравнении с молекулярно-кинетическими размерами, а концентрация частиц столь значительна, что они оказывают существенное влияние и на поток в целом, и друг на друга. И если первое условие в случае ветровой эрозии почвы удовлетворяется (размер почвенных частиц, влекомых ветром, действительно превышает молекулярно-кинетические размеры), то второе — нет. Об этом свидетельствует сосуществование в потоке двух сортов почвенных частиц: перемещаемых ветром скачками и в подвешенном состоянии [29, 131, 240]. Их суммарная концентрация в воздухе, даже при самых сильных пыльных бурях, недостаточна для оказания существенного влияния друг на друга. Более того, влияние почвенной фазы на движение собственно воздуха пренебрежимо мало [74], хотя в тонкой структуре воздушного потока могут быть обнаружены изменения, вызванные насыщением его пылью [10].

Обе указанные причины вынуждают при изучении явления ветровой эрозии почвы ввести мезомасштаб исследования. Это дает возможность исследовать движение индивидуальных почвенных частиц (микромасштаб), а выявленные законы их движения обобщить на весь класс (континуум) подобных частиц методами механики гетерогенных сред (мезомасштаб). Таким образом, единичное полномасштабное (в почвенно-географическом смысле) явление ветровой эрозии, включающее этапы отрыва, подъема, переноса и отложения частиц ветром, в рамках механики многокомпонентных потоков исследуется в мезомасштабе.

В этой же второй главе приведены сведения о теоретических и экспериментальных методах, использованных при выполнении работы, а также о районах, где взяты образцы для исследований, и об их почвах [53, 110–112].

В третьей главе использована а также теоретически и экспериментально обоснована новая трактовка природы подъемной силы, вырывающей частицу из почвы, которая основана на действии «с-вихря» — смерчеподобного вихря, имеющего вертикальную ось вращения; предложено формальное выражение вихревой подъемной силы на основе уравнения Жуковского. По материалам собственных экспериментов и по данным из литературных источников о критических скоростях воздушного потока для разделенных на фракции агрегатов различных почв и сыпучих веществ выведены значения коэффициента подъемной силы, которые могут быть использованы при численных расчетах. Решение задачи о подъемной силе расширило возможности исследования на количественной основе различных аспектов ветровой эрозии и позволило перейти к изучению механизмов потерь почвы, почвозащитного действия противоэрозионных мероприятий, миграции и аккумуляции почвенных частиц, прогнозирования эрозии и расчета противоэрозионных мероприятий [45, 46, 48].

В четвертой главе с использованием теории подобия и анализа размерности, а также методом эксперимента с образцами почвы в аэродинамической трубе найдено более общее, чем уже известные, решение задачи об интенсивности выдувания почвы в зависимости от скорости ветра. Оно основано на применении показателя массообмена [34], позаимствованного из механики [31]. С использованием этого показателя и почвенной постоянной установлен закон выдувания почвы и получено его теоретическое и экспериментальное обоснование. Уравнение, выражающее этот закон и названное нуль-моделью выдувания, было проверено на собственном и на независимом экспериментальном материале. Для ряда образцовых почв получены величины параметра массообмена и почвенной постоянной, которые могут быть использованы при создании региональных математических моделей ветровой эрозии почвы. Дополнительные сведения по материалам главы можно найти в работах [42–44, 46, 48].

В пятой главе изучены механизмы ветровой эрозии почвы на равнине — наиболее простого случая, позволяющего исключить из рассмотрения влияние рельефа на силу и направление ветра. Вместе с тем это наиболее важный в практическом отношении случай, поскольку на равнинах сельскохозяйственные угодья выдуваются большими массами. Масштабы явления ветровой эрозии сопоставимы с масштабами этих массивов, которые характеризуются сравнительной однородностью в отношении устойчивости к выдуванию. Для этого случая впервые получено решение задачи о траекториях почвенных частиц в рамках законов механики с учетом инерции, которое объясняет не только безвозвратный унос частиц, но и скачкообразное их движение (сальтацию). Введен показатель поведения почвенной частицы под действием воздушного потока — эрозионное число, представляющее собой отношение подъемной силы, действующей на частицу, к её весу. Если эрозионное число частицы больше единицы, то частица уносится потоком безвозвратно относительно источника, если меньше — то частица скачет, если равно единице, то частица летит, стремясь к горизонтالي. Продемонстрирована исключительная полезность эрозионного числа при построении теории ветровой эрозии почвы. Решения задачи о траекториях индивидуальных почвенных частиц, полученные на основе использования методов механики многофазных сред и представления о взаимопроникающем движении многоскоростных континуумов, обобщены на весь воздушно-почвенный поток, возникающий при ветровой эрозии почвы. Исследована концентрация почвенной фазы континуума почвенных частиц вдоль траектории его центра массы. Найдена возможность перехода от закономерностей движения индивидуальных частиц к закономерностям движения их совокупностей в рамках законов механики. Основные положения теории подтверждены проверкой на собственных экспериментальных данных и материале из независимых источников [43, 48].

В шестой главе на основе полученных решений проанализирована структура воздушно-почвенного потока, возникающего при эрозии двухкомпонентной модельной почвы, при эрозии трехкомпонентной модельной почвы, содержащей частицы из категории скачущих, и при пульверизационной эрозии почвы, возникающей при её механической обработке в ветреную погоду. Установлено возникновение периодичности в поле концентрации почвенной фазы во время пыльной бури при постоянной скорости ветра в слое воздуха, примыкающем к эродированной почвенной поверхности. В его основе — разделение почвенных частиц потоком на континуумы с собственными траекториями движения. Проанализированы приходные и расходные статьи баланса ветровой эрозии почвы однородного бесконечного поля; результаты анализа обобщены в форме уравнения потерь почвенной массы. Адекватность полученных моделей подтверждена сопоставлением с результатами опыта [46, 48, 259].

В седьмой главе исследован механизм ветровой эрозии почвы, имеющей пространственные границы выдувания: а) в виде линии, отделяющей поле от соседних, и б) в виде ветроустойчивого внутрипочвенного слоя, например плужной подошвы. Выявлена нестационарность явления ветровой эрозии почвы при указанных условиях, в основе которой разная длина скачка частиц, переносимых ветром, и вызванная этим разница в балансе приходных и расходных статей эрозии вдоль потока при постоянстве аргументов уравнения выдувания. Установлены закономерности пространственной и временной динамики потерь почвы при постоянстве аргументов уравнения выдувания, приводящие к разделению единичного явления на пространственно-временные стадии согласно механизму эрозии. Общепринятые представления о стадиях ветровой эрозии почвы, о соответствующих им зонах эрозии в пределах эродируемого поля и примыкающих к нему с подветренной стороны территориях получили количественное обоснование в рамках развиваемой теории. Получено уравнение потерь почвы от ветровой эрозии с ограниченного участка при наличии внутрипочвенной границы выдувания. Материалы главы опубликованы в работах [40, 46, 48, 259].

В восьмой главе исследовано проникание падающей по наклонной траектории частицы в тело почвы при ударе. Предложена качественная картина, которая реализована в виде математической модели взаимодействия абсолютно твердой, не разрушающейся при ударе частицы с почвой по модели пластической среды. Выведена математическая модель, вычленяющая вклад абразии в поток массы, направленный от почвы к атмосфере, который образуется в условиях самовозникающей эрозии. Допущения модели проверены на экспериментальном материале [32].

В девятой главе исследовано самопроизвольно возникающее и поддерживаемое (при постоянной скорости ветра) явление ветровой эрозии, сопровождаемое возникновением лавинного эффекта нарастания переноса почвы и её абразией. Раскрыт механизм лавинного

эффекта и найдено выражение для потока абразива (потока скачущих частиц) на основе уравнений а) выдувания, б) траектории и в) выбивания [32, 49]. Тем самым найдено решение, освобождающее от необходимости произвольного назначения потока абразива, что отличает настоящее исследование от всех ранее известных. Найден механизм самоограничения лавинного эффекта нарастания переноса почвы при неизменной скорости ветра, в основе которого — удаление скачущих частиц из зоны ударного взаимодействия с эродируемой поверхностью, происходящее в результате их перехода из категории скачущих в категорию подвешенных при данной скорости ветра, как следствие истирания. Получено и проверено на экспериментальном материале обобщенное уравнение потерь почвы, учитывающее лавинный эффект и абразию, в котором раскрыта структура почвенной постоянной и параметра массообмена. Это открывает перспективы дальнейших исследований применительно к почвам разного генезиса, свойств и типов хозяйственного использования.

В десятой главе исследовано единичное полномасштабное явление ветровой эрозии почвы. При этом впервые проведен сопряженный анализ

а) математической модели целостного явления ветровой эрозии (включающего этапы выдувания, подъема, переноса и отложения частиц),

б) его изображения на снимках, сделанных из космоса,

в) материалов наземных экспериментов во время пыльных бурь на аналогичных почвах и

г) полей метеорологических величин для исследуемой территории в процессе ветровой эрозии, почерпнутых из интерактивного интернет-источника.

Математическая модель построена в рамках законов механики с учетом уменьшения плотности воздуха с высотой. Полученные решения позволили исследовать структуру воздушно-почвенного потока в стратифицированной (по температуре и плотности) атмосфере и выявить способность ветра к аккумулярованию на ограниченном пространстве однородных почвенных частиц, собранных с огромных по площади эродируемых территорий.

Математическая модель глобального явления ветровой эрозии почвы, полученная в данной главе, заполняет пробел между локальными моделями ветровой эрозии и глобальными метеорологическими схемами явления. Она позволяет связать закономерности выдувания на микроуровне, т. е. на малой в масштабах всего явления ветровой эрозии поверхности, с закономерностями подъема пыли в атмосферу, глобального ее переноса воздушным течением и отложения с формированием золых наносов. Важнейший вывод состоит в том, что все основные черты явления ветровой эрозии при заданных скорости ветра и законе изменения плотности воздуха с высотой определяются свойствами самой почвы. Полученные результаты создают фундамент

для решения многих проблем, в том числе связанных с формированием ареалов повышенной радиоактивности или загрязнения в результате переотложения загрязненных почв (или тонкодисперсных отходов промышленности и энергетики) ветром [33, 47, 113, 261].

Одиннадцатая глава посвящена теоретическим основам предупреждения ветровой эрозии путем повышения устойчивости почвы к выдуванию [50–52]. В ней исследован механизм возникновения структурных связей между механическими элементами в поверхностном слое легкой по гранулометрическому составу почвы, обработанной кондиционером из класса интерполиэлектролитных комплексов. Изучена зависимость межагрегатного сцепления, параметра массообмена и почвенной постоянной выдувания от концентрации кондиционера в почве. Разработана методика оценки эффективности почвенных кондиционеров в снижении выдуваемости почв, усовершенствована структура формулы критической скорости ветра для почвы путем введения показателя, учитывающего вклад межагрегатного сцепления.

Работа выполнена в МГУ им. М.В. Ломоносова. Авторы глубоко признательны академикам Г.В. Добровольскому и Е.И. Шемякину за поддержку научного направления, развиваемого на стыке ряда естественнонаучных дисциплин.

Основные обозначения и постоянные

B	— параметр массообмена;
B_K	— параметр массообмена при $U = U_K$;
E_i	— эрозионное число;
$F_{Ж}$	— подъемная сила в проекции на вертикаль;
$F_{л}$	— лобовое сопротивление;
F_C	— сила сопротивления Стокса;
F_c	— сила сцепления в проекции на вертикаль;
Q	— потеря почвы от ветровой эрозии [кг] за время t [с] с площади S [м ²];
K_{**}	— коэффициент подъемной силы;
R	— универсальная газовая постоянная;
T	— абсолютная температура;
U	— скорость потока воздуха;
U_e	— скорость потока воздуха за пределами слоя шероховатости;
U_K	— критическая скорость ветра, при которой начинается эрозия;
V_x, V_y	— компоненты скорости смещения переходного по интенсивности потерь участка эродируемой почвенной поверхности;
$W_{п}$	— объем потерь почвы;
a_i	$= 3\varphi\eta/4r_i^2\rho_{п}$;
$c_{тр}$	— коэффициент сопротивления почвенной поверхности;
c_f	— коэффициент лобового сопротивления частицы;
c_{iw}	— концентрация частиц, утративших сцепление с почвой;
e	— основание натуральных логарифмов;
g	— ускорение силы тяжести;
h_L	— скрытая теплота фазового перехода;
p	— давление;
q	— интенсивность выдувания почвы [кг/(м ² с)];
r_i, r_j	— радиус частиц;
t	— время;
v_i, w_i, u_i	— компоненты скорости ветра;
v_i, v_{ix}, v_{iy}	— скорость частиц и ее проекции на оси x, y ;
$v_{ix}^{\circ}, v_{iy}^{\circ}$	— проекции начальной скорости старта центра масс на оси x, y ;
v_{iy}^k	— вертикальная составляющая скорости i -го континуума, к которой асимптотически стремится v_{iy} ;
x, z, y	— абсцисса, аппликата, ордината;

-
- z_0 — параметр шероховатости почвенной поверхности;
- α — постоянная выдувания;
- α_n, β — произвольные постоянные;
- $\alpha_i, \alpha_i^{\circ}$ — объемная концентрация частиц r_i , соответственно в почве и в потоке (при $t = 0, \alpha_i = \alpha_i^{\circ}$);
- Δ — приращение величины; падение температуры воздуха при подъёме на 100 м;
- $\rho_v, \rho_{v0}, \rho_{гв}, \rho_{ч}, \rho_{п}, \rho_i, \rho_{вд}$ — плотность: воздуха, воздуха на уровне моря, частиц почвы, падающих частиц, поверхностного слоя почвы, i -го континуума, воздуха в точке перелома кусочнолинейной функции зависимости плотности от высоты;
- φ — коэффициент Стокса;
- η — вязкость воздуха;
- τ — касательное напряжение [Н/м²].

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ

Почва — основа существования человеческой цивилизации. Эта идея занимает центральное положение в учении об экологических функциях почвы, развиваемом трудами Г. В. Добровольского, Л. О. Карпачевского, Е. Д. Никитина [59, 64, 65, 67, 68, 92–96]. Главными, наиболее быстро текущими и часто принимающими характер катастрофы факторами нарушения функций почвы в глобальном масштабе Г. В. Добровольский [65] называет водную и ветровую эрозии. Важнейшая из функций почвы, обеспечение человека пищей, в наибольшей степени нарушается именно в результате эрозии. Об этом свидетельствует динамика самого информативного показателя обеспеченности людей продовольствием — объема производства зерна на душу населения. Достигнув максимума (346 кг) в 1984 г., он снижается и, при сохранении темпов снижения, к 2030 г. опустится до 248 кг, т. е. до уровня пятидесятих годов двадцатого столетия [323]. Среди главных причин такого положения, наряду с ростом самого населения, — эрозия почвы. Механизмы ее влияния весьма многообразны. Это и снижение плодородия эродированных почв, и уменьшение площади пашни в результате образования оврагов и надвигания песков, и загрязнение почв сельскохозяйственных угодий вредными веществами, в том числе токсичными солями, приносимыми ветром с поверхности солончаков и отвалов горных пород, а также снижение фотосинтеза в результате загрязнения листовой поверхности пылью [78, 135, 137, 323].

Почва — регулятор вещественного состава атмосферы [66]. Эрозионные процессы оказывают прямое и весьма сильное влияние на эту функцию почвенного покрова планеты, в первую очередь через ускорение минерализации почвенного органического вещества, приводящее, в конечном счете, к увеличению содержания в атмосфере углекислого газа и связанному с ним усилению парникового эффекта [249]. Кроме

того, ветровая эрозия почвы является главной причиной наполнения воздуха пылью, причем масштабы поступления почвенной пыли столь велики, что она начинает влиять на тепловой баланс планеты [292].

Почва — основа существования наземных экосистем. Представления об ее экосистемных функциях и механизмах их реализации непрерывно расширяются. Некоторые из этих механизмов связаны с ветровой эрозией почвы. В частности, появились сведения о том, что почвенная пыль, приносимая ветрами из Сахары, является важнейшим источником существования водных экосистем Атлантического океана и тропических лесов бассейна Амазонки, куда ежегодно приносится из Сахары до 190 кг/га почвы [329], а также экосистем бассейна Средиземного моря [274].

Почва — важнейший регулятор биогенного углерода на Земле. Расчетное содержание его в метровом слое почвы составляет $2,5 \cdot 10^{12}$ т, что в три раза превышает содержание в атмосфере и в 4,5 раза — в живых организмах. Эрозия приводит к его утрате почвой, во-первых, в результате механического удаления из эродируемой почвы, во-вторых, в ходе ускоренной минерализации, вызванной эрозией, как в эродированной почве, так и в наносной (табл. 1.1). Процессы, приводящие к этому, требуют углубленного изучения, но уже теперь не подлежит сомнению, что одним из немногих возможных способов изъятия избытка углерода из атмосферы является запасание его в виде специфического органического вещества почвы. Известен и метод достижения этой цели — использование почвозащитных систем земледелия [100, 102].

Почва — основа среды обитания человека и ее эрозия приводит к нарушению средообразующей функции. В частности, обыкновенная почвенная пыль, поднимаемая ветром, вызывает увеличение заболеваемости астмой [323]. При большом содержании почвенной пыли в воздухе, как это было 8–9 апреля 2001 г. в Пекине, а также 14 мая того же года в Каире, полностью парализуется жизнь огромного мегалополиса. Ситуация столь серьезна, что во многих странах законодательно вводятся пределы допустимого содержания пыли в атмосфере [323]. Кроме того, пыль может служить причиной возникновения эпидемий, так как содержит повышенное количество спорозонных аэробных бактерий [4]. Еще большую опасность несет радиоактивная пыль, источниками которой являются эродируемые ветром почвы загрязненных территорий [149], а также золоотвалы теплоэлектростанций, работающих на углях, содержащих радиоактивные элементы и тяжелые металлы [128, 133].

Частота и масштабы проявления ветровой эрозии почвы, которые стали глобальными, а также темпы и тенденции её распространения имеют угрожающий характер. Об этом свидетельствуют многочисленные материалы последних международных форумов ученых и общественности, организованных Докучаевским обществом почвоведов [148, 179, 180, 245], Международным обществом почвоведов (ISSS) [303], Международной организацией мелиорации почв (ISCO) [331,

249], Европейским обществом охраны почв (ESSC) [250], Организацией охраны почв и вод (SWCO), публикации в периодической печати [80].

Эрозии подвержены почвы на площади в 1,643 млрд.га, из них в чрезмерной степени — на площади в 250 млн.га (табл. 1.1.1). Водная эрозия распространена на площади в 1094 млн.га, а ветровая — на площади в 549 млн.га. Ареалы почв, пораженных этими двумя видами эрозии, совпадают лишь частично. Согласно прямым спектрометрическим измерениям со спутника [308], пыльные бури, как крайнее проявление ветровой эрозии почвы, возникают во всех почвенно-климатических поясах, в том числе в арктическом, но наиболее часто и устойчиво они повторяются в Северном полушарии, в так называемом пыльном поясе, протянувшемся от западных окраин Северной Африки, через Ближний и Средний Восток, Центральную и Южную Азию в Китай. Поскольку основной прирост подверженных пыльным бурям территорий приходится на малообжитые районы, появляются основания полагать, что в основе усиления ветроэрозионной деятельности лежат причины глобального характера [317], в том числе и антропогенного происхождения.

На долю эрозии приходится 83% площади территории деградированных почв [303]. В наибольшей степени эрозии подвержены почвы наиболее густонаселенных регионов земного шара. Это свидетельствует в пользу общепринятого представления о том, что в местах обитания человека эрозия имеет, в основном, антропогенный характер [249]. Особенно опасным является то, что эти же регионы являются и главными источниками продовольствия. Серьезность сложившейся ситуации подтверждается тем знаменательным фактом, что более всего эрозия почв распространена не только в самых отсталых в промышленном отношении странах, но и в самых развитых [323].

Таблица 1.1.1. Утрата углерода почвой вследствие эрозии в мировом масштабе [249]

Эрозия	Водная		Ветровая	
	Площадь, млн.га	Утрачено углерода, т/га	Площадь, млн.га	Утрачено углерода, т/га
Слабая	343	5	269	2,5
Умеренная	527	20	254	10,0
Ускоренная	224	40	26	20,0
Всего	1094		549	

Согласно данным государственного учета [56] по состоянию на 1 января 1996 г. фактически подвержено эрозии почв 28 % (51 млн.га) площади территории сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Кроме того, на 35 % площади (66 млн.га) существует реальная опасность проявления эрозионных процессов. На площади в 35 млн.га почвы эродированы водой, а на площади 15,9 млн.га — ветром; реальная опасность проявления водной эрозии существует еще на 29,6 млн.га, а ветровой — на 45 млн.га. Причем в таких важнейших в отношении устойчивого производства зерна регионах, как Поволжский и Северо-Кавказский, к категории эродированных и опасных в отношении эрозии относится до 90 % площади сельскохозяйственных угодий.

Глобальные масштабы проявления ветровой эрозии почвенного покрова Земли и наметившаяся тенденция к её усилению ставят задачу изучения ветровой эрозии в ряд приоритетных направлений почвоведения [6, 135, 229, 246, 281]. Некоторые из научных проблем ветровой эрозии почвы являются одновременно предметом перечисляемых ниже фундаментальных и прикладных наук, а также задачами практики.

В механике: закономерности отрыва, переноса и отложения в виде наносов твердых частиц потоками жидкости и газа [160, 162, 189, 222, 316, 330].

В биологии: влияние засекания почвенными частицами, переносимыми ветром, на рост и развитие растений; зависимость интенсивности фотосинтеза от степени запыления листовой поверхности [214, 217]; механизмы распространения семян и живых организмов воздушным путем [26, 27, 140, 313] механизмы межконтинентального переноса бактерий и грибов [269].

В экологии: механизмы подъема и переноса по воздуху радионуклидов и других загрязняющих веществ с почвенной пылью; закономерности формирования их природных и антропогенных ареалов [169, 121, 122, 262, 334].

В эпидемиологии: механизмы переноса возбудителей болезней и загрязняющих веществ с почвенной и промышленной пылью [25, 122, 315].

В геологии: механизмы и природная обстановка формирования древних осадочных отложений, в особенности залежей полезных ископаемых, под действием ветра [131, 183, 228, 258].

В вулканологии: механизмы переноса и отложения вулканической пыли ветром [131].

В грунтоведении: механизмы разрушения и методы закрепления фундаментов и опор инженерных сооружений в подвижных эоловых песках [140].

В горном деле: механизмы подъема пыли в горных выработках и с поверхности хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов, отвалов шахт и карьеров и методы обеспыливания [264].

В планетологии, геоморфологии: закономерности формирования рельефа под действием ветра на Земле [200] и других планетах солнечной системы [123, 247, 303].

В климатологии: восстановление палеоклиматов и тарирование климатологических моделей на основе исследования закономерностей золотого осадконакопления в прошлом [54, 276, 277] и настоящем [313].

В физике атмосферы: влияние почвенной пыли, поднимаемой ветром, на динамику и вещественный состав атмосферы [195, 223, 231].

В космонавтике: прогнозирование пыльных бурь на планетах солнечной системы для целей обеспечения безопасности поднимаемых и спускаемых аппаратов [224, 265].

В наземном транспорте: защита транспортных систем от песчаных заносов, выдувания и снижения дальности видимости на автодорогах [83, 89].

В воздушном транспорте: снижение пылимости грунтов взлётно-посадочных полос и рулѐжных дорожек аэродромов и почв прилегающих территорий [194].

В микроэлектронике: обеспыливание поверхности воздушным потоком и ударной волной [320].

В энергетике: исследование механизмов переноса тонкодисперсных частиц газовым потоком в целях повышения безопасности реакторов [220], обеспыливание золо- и шлакохранилищ [133].

Для решения перечисленных проблем необходима такая теория ветровой эрозии почвы, которая давала бы качественное описание механизмов явления и позволяла перейти к количественным расчетам (прогнозированию). С использованием существующих моделей выдувания [1, 21, 37, 70, 76, 89, 90, 129, 202, 240] в каждом отдельном случае удается путем подбора эмпирических коэффициентов добиться отличного соответствия предсказанных потерь наблюдаемым в опыте, но обобщение этих моделей затруднено и приводит к усложнению решений. В связи с этим построение теории необходимо начать с совершенствования структуры уравнения выдувания.

Другая трудность связана с необходимостью выявления и учета степени влияния длины эродируемого участка на баланс эрозии. Известные решения этой задачи сводятся к обобщению опытных данных на основе идеи Бэгнолда [219] о существовании предела роста интенсивности переноса почвы ветром с расстоянием. В частности, в так называемом американском уравнении ветровой эрозии почвы влияние длины учитывается на основе именно этой идеи и реализуется с использованием графоаналитического метода [337], суть которого описана в [111]. Этот подход в том или ином варианте применяется в большинстве известных моделей ветровой эрозии почвы [115, 127, 203]. Разработанный путем обобщения натуральных наблюдений, он неявно зависит от технологий сельскохозяйственного производства в регионе исследования, т. е. на равнинах Северной Америки, и по причине

распространения новых технологий он исчерпал себя. На смену ему разрабатывается новая методика [254], также не выходящая за рамки эмпирического обобщения [326] и по этой причине ограниченная в применении. Имея в виду создание теории ветровой эрозии, необходимо решить проблему влияния длины пылесборной площади в рамках законов механики. С этой целью в работе исследованы механизмы отрыва, подъема, переноса и ударного взаимодействия индивидуальной почвенной частицы с подстилающей поверхностью, а полученные результаты обобщены на самопроизвольно возникающий поток таких частиц. При этом установлены механизмы лавинного эффекта нарастания массопереноса и абразии почвенной поверхности в зависимости от длины эродируемого участка.

Важнейшим направлением исследований является изучение механизмов переноса, преобразования и отложения почвенной пыли ветром с образованием наносных почв. Трансграничный перенос поднятой ветром почвенной пыли, как и перенос аэрозолей промышленного происхождения, за неимением другого, более обоснованного решения, моделируют на основе уравнений диффузии [9, 341], а интенсивность источника почвенной пыли оценивают на основе уравнений выдувания и связанных с ними уравнений переноса в приземном слое, причем вопрос о доле потока массы, уносимой безвозвратно относительно источника, решается достаточно произвольно, на основе эмпирических соотношений [255, 256, 292, 293]. В связи с этим возникает необходимость выявления структуры всего воздушно-почвенного потока, начиная с области его формирования (в зоне выдувания) и заканчивая областями переноса и отложения почвенной фазы ветром, в зоне аккумуляции.

Все основные характеристики ветровой эрозии, в том числе структура воздушно-почвенного потока, структура и объем потерь почвы, характер эоловых отложений, при прочих равных условиях определяются свойствами эродируемой почвы [43], поэтому в основе большинства противоэрозионных мероприятий лежит идея воздействия на почву с целью повышения ее устойчивости к выдуванию. Сравнение эффективности отдельных противоэрозионных мероприятий, оцениваемых опытным путем, производится на основе эмпирических соотношений. Переход к использованию межагрегатного сцепления в качестве одного из показателей состояния поверхностного слоя почвы повышает надёжность предварительной оценки эффективности разных противоэрозионных мероприятий и обеспечивает полезным инструментом исследования механизмов, лежащих в основе противоэрозионных мероприятий.

Отмечая достижения в решении проблем теории ветровой эрозии почвы, необходимо указать на главное, что мешает дальнейшему продвижению в их решении, — это использование единого механизма при исследовании разномасштабных природных явлений, из которых складывается ветровая эрозия почвы, и последующее навязывание

его при объяснении опытных данных. Но явления «микромира» не тождественны явлениям «макромира», поэтому при описании разномасштабных процессов надо применять методы, адекватные их масштабу. Для описания процессов отрыва, переноса, преобразования и отложения почвенных частиц воздушными потоками вполне пригодны методы механики многофазных сред [132, 164]. По этой причине математическая постановка задач осуществлялась при некоторых ограничениях, упрощающих решения, но не меняющих их качественно. Данные ограничения сохраняются во всех главах книги, хотя сами решения указывают на необходимость учета изменения тех или иных параметров, которые считались постоянными величинами. Это обстоятельство указывает на возможность развития теории путем ее уточнения или даже на основе отказа от принятых предположений относительно указанных параметров, что, впрочем, выходит за рамки данной работы. Создаваемая теория при появлении новых условий и решений позволяет их учитывать, что прослеживается в данной работе. Наличие теории обеспечит предпосылки для решения других актуальных задач — создания научных основ прогнозирования и предупреждения эрозии на почвах разного происхождения в разнообразных условиях их хозяйственного использования, а также решения проблем происхождения и эволюции эологенных почв, в том числе засоляющихся воздушным путем; создания научных основ прогнозирования и предупреждения загрязнения воздуха почвенными частицами и тонкодисперсными продуктами и отходами промышленности с неорганизованных мест их производства и размещения.

Таким образом, учитывая отсутствие теории полномасштабного явления ветровой эрозии почвы и потребность в ней науки и практики, была сформулирована основная цель работы — создание в рамках законов механики многофазных сред теории ветровой эрозии почвы и разработка основ количественных методов прогнозирования эрозии и расчета противоэрозионных мероприятий.

Глава 2

ВЕТРОВАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВЫ — ГЛОБАЛЬНОЕ ЯВЛЕНИЕ

Создание физически содержательной теории ветровой эрозии почвы начато с обобщения известных экспериментальных материалов и воспроизведения на этой основе качественной картины явления, что позволило уточнить предмет исследования при построении количественной теории. При этом выявлены его особенности как объекта механики многофазных сред, не позволяющие вести исследования в макромасштабе и вынуждающие поэтому ввести мезомасштаб. Задача перемещения почвенных частиц в атмосфере сведена к анализу движения сферического тела известного радиуса и плотности в поле тяготения под действием сил со стороны воздуха. На основании этого анализа составлены уравнения движения частиц почвы в продольной и вертикальной координатах, которые решаются в последующих главах, а полученные для отдельных частиц решения обобщаются на потоки массы взаимопроникающих многоскоростных континуумов. Описаны применявшиеся при этом теоретические и экспериментальные методы и полученные результаты.

2.1. Качественная картина ветровой эрозии почвы

Под эрозией почвы в настоящее время понимают совокупность взаимосвязанных процессов отрыва, переноса и отложения почвы (иногда материнской и подстилающей пород) поверхностным стоком временных водных потоков и ветром [41, 111]. Явление ветровой эрозии почвы зарождается на границе твердой и газообразной сред (почвы и воздуха), развивается в прилегающем к Земле слое атмосферы и завершается на земной поверхности, водной или почвенной. Несмотря на изменчивость состава и свойств, атмосфера характеризуется хорошо выраженной структурированностью. Основным элементом ее структуры можно считать вихрь [74, 168, 195]. Вихри могут быть замкнутыми

(тороидальными) и открытыми с торцов в поток [131, 142]. Они формируют непрерывный спектр атмосферных образований, от микроскопических завихрений, соизмеримых с размерами молекул, до гигантских систем, именуемых циклонами и антициклонами, соизмеримых с целыми континентами (рис. 2.1.1).

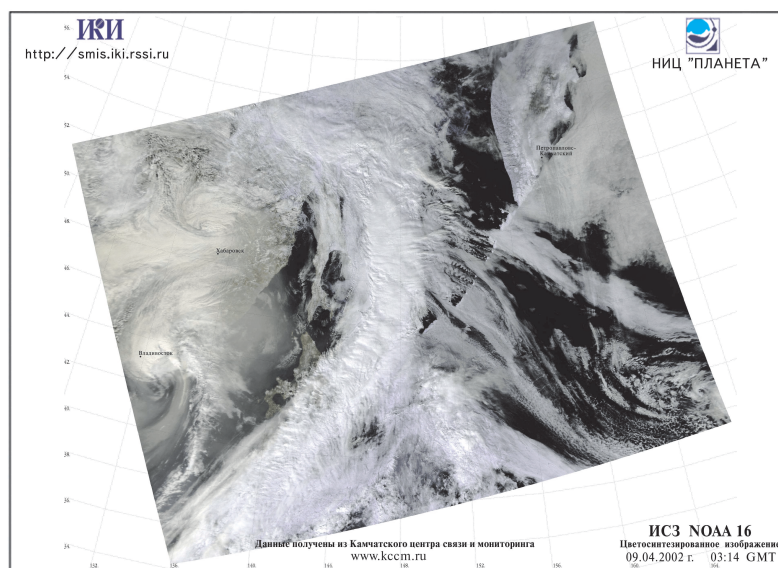


Рис. 2.1.1. Пример пыльной бури и крупномасштабных вихрей 9 апреля 2002 г. на Дальнем Востоке (источник: <http://smis.iki.rssi.ru>). На снимке: в правом верхнем углу — Камчатка, слева посередине — Владивосток, правее которого — видимая часть пыльной бури, уходящей в море

В этом спектре привлекают внимание своей силой ураганы, бури, тайфуны, имеющие масштабы порядка сотен километров (рис. 2.1.2). В районе, непосредственно примыкающем к «глазу» урагана, скорость ветра нередко превышает 200 км/ч.

Практически безопасными в отношении эрозии, но очень показательными в иллюстрации единства законов, управляющих движением потоков разного масштаба, являются вихри, возникающие при обтекании сравнительно спокойным потоком высоких препятствий, таких как горные хребты или одиночные горы. В некоторых случаях такие вихри, имеющие вертикальную ось, формируют серии, называемые «дорожками» Кармана (рис. 2.1.3).

Большой разрушительной силой и частотой характеризуются смерчи и тромбы, в Америке именуемые «торнадо». Они имеют размер порядка сотен метров (рис. 2.1.4).

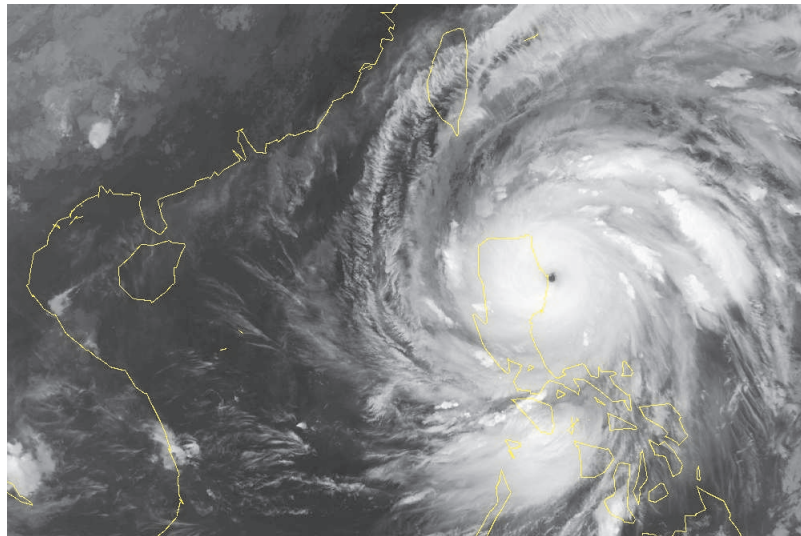


Рис. 2.1.2. Тропический ураган Зеб над Японией 9–18 октября 1998 г. (отчетливо виден «глаз» урагана, за пределами которого скорость ветра достигала 155 узлов)

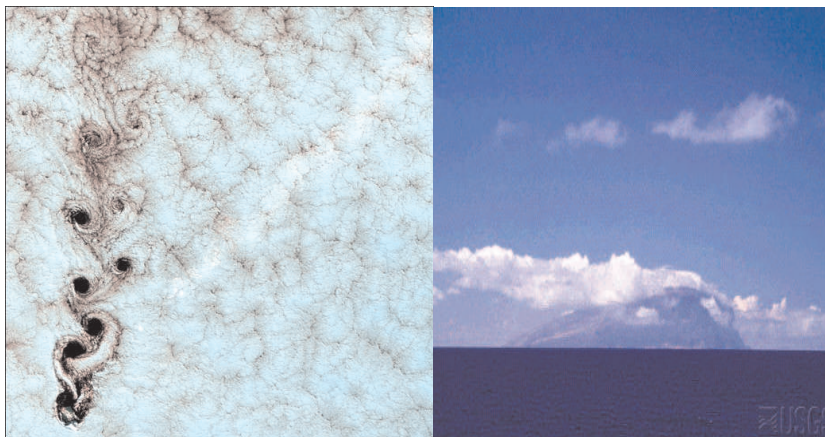


Рис. 2.1.3. Чилийский остров Селькирк (на правом снимке) — скала высотой до 1,5 км над поверхностью океана. В воздушном потоке, огибающем остров (на левом снимке он внизу, в нижней части темного овального пятна), формируются вихри, слева — вращающиеся по часовой стрелке, справа — против. Эти чередующиеся вихри образуют вихревую дорожку Кармана, сфотографированную со спутника 15 сентября 1999 (источник: <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>)



Рис. 2.1.4. Тромб с каскадом (источник: NOAA, National Severe Storms Laboratory Collection, фото № nssl0062 от 24 мая 1973 г. Юнион Сити, Оклахома, США)

Подобны торнадо значительно уступающие им в размерах и разрушительной силе атмосферные образования с вертикальной осью, так называемые пыльные вихри. Их характерный масштаб — порядка десятков метров (рис. 2.1.5).



Рис. 2.1.5. Пыльный вихрь в штате Вашингтон, США (источник: www.aeriane.com/events.htm)