

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. І. І. МЕЧНИКОВА

На правах рукопису

Світличний Олександр Олексійович

**«КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК  
СХИЛОВОГО ЕРОЗІЙНОГО ПРОЦЕСУ  
І ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ  
ЕРОЗІЙНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ЗЕМЕЛЬ**

11.00.11 — Конструктивна географія  
і раціональне використання природних ресурсів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора географічних наук

Одеса — 1995

1.5/9

ДВ 33.047

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі докористування Одеського держ

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761241 (L)

Науковий консультант:

Доктор географічних наук, професор  
**ШВЕБС Генріх Іванович**

Офіційні опоненти:

1. Доктор географічних наук, професор  
**ГОПЧЕНКО Євген Дмитрович**
2. Доктор географічних наук, професор  
**ОЛІФЕРОВ Август Миколайович**
3. Доктор технічних наук, професор  
**ЧЕРВАНЬОВ Ігор Григорович**

Провідна установа:

Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. А. Н. Соколовського УААН, м. Харків.

Захист відбудеться «**26**» жовтня 1995 року о **10<sup>00</sup>** год. на засіданні спеціалізованої ради Д 05.01.04 при Одеському державному університеті ім. І. І. Мечникова за адресою: 270058, Одеса, Шампанський пров., 2, ГГФ.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Одеського держуніверситету за адресою: 270000, м. Одеса, вул. Преображенська, 24.

Автореферат розісланий «**22**» вересня 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат географічних наук, доцент **ЖАНТАЛАЯ П. І.**

**ЛНБ ім. В. Стефаніка**  
**АН України**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

**Актуальність теми.** Водна ерозія ґрунтів відноситься до найбільш небезпечних деградаційних процесів, які наносять величезні економічні збитки в багатьох країнах світу. Однак, оскільки вона торкає практично всі компоненти ландшафту і порушує його екологічний баланс, водна ерозія становить проблему також і комплексну екологічну, одну з тих, рішення яких обумовлює національну безпеку більшості країн світу (Браун, 1989). Не є винятком і Україна. По стану на кінець 1985 року в Україні було еродовано близько третини сільськогосподарських земель, або 12 млн. га. В Західному Причорномор'ї, Лівобережному степу та Південному лісостепу відсоток змитих ґрунтів суттєво вище—тут еродований практично кожен другий гектар ріллі (Швебс, 1987). В наявності подальше прогресивне збільшення площі еродованих земель, зумовлене суттєвим перевищенням сучасної інтенсивності змиву ґрунту, так званих, "допустимих втрат ґрунту"—за 20 років—з 1961 по 1980—площа еродованих земель в Україні збільшилась на 16% (Смирнова, Можейко, 1989), а за останню чверть сторіччя—на 26% (Борщевський, Данілішин, 1992). Щорічно збитки, які наносяться економіці України ерозією та дефляцією по оцінці С.Ю. Булигіна прирівнюються з вартістю річної сільськогосподарської продукції в країні (Булигін, 1994).

Оптимізація ерозійної підсистеми природно-господарських територіальних систем (ПТС) сільськогосподарського призначення—агрландшафтів, таким чином, для більшості регіонів України являється необхідною умовою створення екологічно збалансованих високопродуктивних агрландшафтів. Основною оптимізації ерозійної підсистеми агрландшафту являються математичні моделі ерозійного процесу, які адекватно відображають в формалізованому вигляді достатньо складний характер впливу природних і господарських факторів на характер та інтенсивність ерозійного процесу. Але, незважаючи на безперечний прогрес в галузі розробки методів кількісної оцінки водної ерозії ґрунтів в останні два десятиріччя (W.H.Wisohmeier, D.D.Smith, Г.І.Швебс, П.С.Мірцхулава, G.R.Foster, L.D.Meyer, Г.П.Сурмач, В.Д.Іванов, І.К.Срібний, R.P.C.Morgan, В.А.Білолипський, А.Б.Лавровський, Г.А.Ларіонов, Є.А.Гаршнінов, А.Р.Ж.Де Роо та ін.), проблема далека від свого повного рішення. Існуючі моделі потребують подальшого удосконалення на основі накопичених в останні роки знань та да-

них про процеси стоко- і наносоутворення на схилах та транспорту наносів в умовах яскраво вираженого нестационарного характеру процесу. Надто серйозну проблему також становить розробка принципів та методів оптимізації ерозійної системи агроландшафтів з використанням сучасних інформаційних технологій, в першу чергу-геоінформаційних, у використанні яких в країні зроблені лише перші кроки.

**Мета і завдання роботи.** Метою роботи є розробка принципів і методів кількісної оцінки характеристик водної ерозії ґрунтів, які враховують особливості просторово-часової диференціації схилового ерозійно-аккумулятивного процесу і їх застосування до вирішення завдань щодо обґрунтування використання ерозійно-небезпечних земель.

В роботі вирішуються такі головні завдання:

1. Виконати систематизацію і теоретичний аналіз сучасних підходів до моделювання водної ерозії ґрунтів і стоку схилових наносів.

2. Дати кількісну оцінку сучасних методів урахування рельєфних умов ерозійного процесу.

3. Виконати теоретичне і експериментальне обґрунтування закономірностей змінення характеристик схилового ерозійного процесу вдовж схилу і принципів удосконалення емпіричних моделей змиву ґрунту.

4. Виконати теоретичне обґрунтування та практичну реалізацію динамічної моделі схилового ерозійно-аккумулятивного процесу, яка враховує основні особливості стоко- та наносоутворення в умовах степу та лісостепу України.

5. Обґрунтувати принципи середньомасштабної оцінки і картографування ерозійної небезпеки земель, в тому числі, існуючого та перспективного зрощення, яка враховує особливості просторової структури ерозійного процесу.

6. Розробити методичні принципи застосування моделей ерозійного процесу для обґрунтування використання ерозійнонебезпечних земель з застосуванням сучасних інформаційних технологій.

**Об'єкт та предмет досліджень.** Об'єктом досліджень являються природно-господарські територіальні системи сільськогосподарського призначення степу та лісостепу України. Предметом-схиловий ерозійно-аккумулятивний процес в результаті зливових опадів.

**Методологія та методи досліджень.** Методологічну основу роботи становлять концепції схилового ерозійно-аккумулятивного процесу як діалектичної єдності процесів змиву і акумуляції, імітаційного моделювання як методу досліджень та оптимізації складних систем і технології Географічних інформаційних систем, як сучасної комп'ютерної технології обробки просторово розподіленої інформації.

В процесі виконання роботи були використовані різноманітні методи теоретичних та польових досліджень: порівняльно-географічний, картографічний, диференціальних рівнянь, математичної статистики, моделювання, оптимізації, наземних польових обстежень, інструментальної зйомки, штучного дощування стокових площадки, тощо.

Для обґрунтування та перевірки теоретичних положень широко використовані дані спостережень польових експериментальних баз системи Держкомгидромету, зокрема Богуславської польової експериментальної гідрологічної бази (Київська область), Велико-Анадольської (Донецька область) та Молдавської (Республіка Молдова) водно-балансових станцій, дані спостережень на опорній сітці метеорологічних станцій території Українського Причорномор'я і південної частини Республіки Молдова, картографічні матеріали, архівні матеріали кафедри фізичної географії та природокористування Одеського державного університету ім. І.І. Мечникова, а також дані польових досліджень, виконаних під керівництвом і за участі автора протягом 1981–1992 рр.

Імітаційне моделювання виконувалося з використанням IBM сумісних персональних комп'ютерів з мікропроцесорами Intel-80286 та Intel-80486. Для просторової реалізації модифікованого варіанту логіко-математичної моделі змиву ґрунту використовано програмний пакет PC-Raster, розроблений на кафедрі фізичної географії Університету м.Утрехта (Нідерланди) (Van Deursen, Weseling, 1992).

**Основні положення, що захищаються.**

1. В умовах яскраво вираженого нестационарного режиму зливового наносоутворення інтенсивність змиву ґрунту не збільшується одноманітно при віддаленні від вододілу або точки зародження стоку на протязі всього схилу, а тільки в межах так званої "зони активного наносоутворення", довжина якої для орних земель рівнинної частини України становить в середньому 60–150

м. За межами зони активного наносоутворення характер та інтенсивність ерозійного процесу визначається місцевими умовами, головним чином, уклоном та шорсткістю поверхні.

2. Для повздовжнього профілю схилу характерна наявність хвиль з характерним розміром від декількох метрів до 100–150 м, що забезпечує механізм саморегуляції схилу як системи і яка в проявленнях в межах схилової ланки принципу взаємодії потоку і русла, сформульованного М.А.Великановим. Облік цієї особливості будови поверхні схилів необхідний як при оцінці ерозійної небезпеки території, так і при оптимізації агроландшафтних систем.

3. Просторово розподілений характер факторів ерозійного процесу потребує при оцінці ерозійної небезпеки території застосування просторово розподілених моделей ерозійного процесу, можливості практичної реалізації яких в нинішній час представляє технологія Географічних інформаційних систем.

4. Внаслідок зміни фізичних, хімічних та мікробіологічних властивостей ґрунтів на зрошених землях змінюються умови наносоутворення, однак при раціональному поливанні не відбувається загального збільшення ерозійної небезпеки території. Системи протиерозійних заходів на зрошених землях повинні проектуватися з розрахунком на захист ґрунтів насамперед від зливової ерозії з обліком зміни структури ерозійної небезпеки.

5. Найбільш доцільним для оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель є застосування методу імітаційного моделювання, який опирається на адекватну модель схилового ерозійно-аккумулятивного процесу та модель раціонального використання ґрунтових ресурсів як одного з природних ресурсів, що відновлюється.

Наукова новизна і практична цінність роботи. Вперше теоретично і експериментально обґрунтована закономірність зміни по довжині схилу характеру та інтенсивності ерозійного процесу, що дало можливість обґрунтувати принципи розробки емпіричних моделей ерозійно-аккумулятивного процесу, які дозволяють зробити оцінку змиву ґрунту та/або акумуляції наносів на схилах довільної довжини та форми. Виконані теоретичне обґрунтування і розробка детальної теоретичної моделі ерозійно-аккумулятивного процесу, яка враховує основні особливості зливового схилового стоку води і наносів в агроландшафтах степу і лесостепу України. Розроблені принципи оцінки просторової структури ерозійного

процесу і розробки просторово-розподіленої системи оптимізації ерозійної системи агроландшафту на основі ГІС технологій.

**В методичному плані:**

Розроблені методичні основи кількісної оцінки впливу рельєфних умов ерозійного процесу з використанням різномірних даних, зміни факторів скилового ерозійного процесу під впливом зрощуваного землеробства, застосування методу імітаційного моделювання до дослідження ерозійного процесу і оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель. Розроблені методики середньомасштабної оцінки і картографування ерозійної небезпеки богарних і зрощуваних земель та обліку скилової мезо- і мікрохвилястості при протиерозійному проектуванні різного масштабу, в тому числі, з використанням ГІС технологій.

**В практичному плані:**

Виконані оцінка факторів рельєфних умов сучасних емпіричних моделей змиву ґрунту, оцінка зміни факторів ерозійного процесу під впливом зрошення, оцінка впливу природних і господарських факторів на протиерозійну стійкість агроландшафтних систем, середньомасштабна оцінка і картографування ерозійної небезпеки орних земель Одеської області, районування Українського Причорномор'я по кліматичним умовам зливогого змиву.

**Практична реалізація наукових розробок.** Результати досліджень використані при виконанні наукової теми ДКНТ України 3.5. 2.1. "Географічні основи раціонального природокористування Причорномор'я", теми Мінвузу України "Розробити базові моделі ґрунтозахисних систем контурно-меліоративного землеробства і нормативів раціонального упорядження структур земельних угідь", тем ДКНТ України 2.01.03/021 "Розробка моделі ерозійно-акумулятивного процесу, включаючи стік наносів в руслах малих річок, як основи проектування басейнових ерозійностійких агроландшафтів степу і лісостепу України" і 6.3/264 "ГІС-районування природно-ресурсного потенціалу: розробка теоретичних основ і методики комплексного експертно-формалізованого підходу стосовно до наук про Землю", підпрограми "Ерозія і дефляція. Агроекологічна оцінка і прогнозування" проекту "Агроекологія (агроекологічний моніторинг)" Української аграрної академії наук, кількох господарських тем щодо обґрунтування протиерозійних заходів при меліоративному проектуванні (III черги зрошення із Північно-Кримського каналу; Добрянської зрошувальної системи (ЗС), Кіро-

воградська область; Трикратської ЗС, Миколаївська область; III черги Явкінської ЗС, Миколаївська область; масиву межиріччя Ботна-Бик, Республіка Молдова), науково-дослідної теми "Розробка імітаційної моделі "Водні ресурси зрошуваного регіону" і проектів землевпорядкування і землекористування для ряду фермерських господарств Одеської та Миколаївської областей. Результати досліджень реалізовані також в навчальному процесі при викладанні автором курсів "Охорона і раціональне використання водних ресурсів" та "Геоінформаційні системи" на географічному відділенні ОДУ ім. І.І.Мечникова.

**Агортація результатів досліджень.** Основні положення дисертації доповідалися на Всесоюзних наукових конференціях "Теоретичні основи протиерозійних заходів" (Одеса, 1979), "Закономірності прояву ерозійних і руслових процесів в різних природних умовах" (Москва, 1981, 1987), Республіканській науково-практичній конференції "Природне середовище і територіальна організація виробництва" (Кишинів, 1982), I (Харків, 1982), II (Харків, 1986) і IV (Харків, 1994) з'їздах ґрунтознавців і агрохіміків України, VIII Всесоюзному з'їзді ґрунтознавців (Новосибірськ, 1989), Республіканській науковій конференції "Чорноземи Молдавії і напрямки їх раціонального використання" (Кишинів, 1984), V Всесоюзному гідрологічному з'їзді (Ленінград, 1986), VIII Всесоюзній конференції з меліоративної географії (Таллінн, 1988), Республіканській науковій конференції "Екологічні аспекти використання і охорони ґрунтових ресурсів Молдавії (Кишинів, 1990), VI (Одеса, 1990) і VII (Київ, 1995) з'їздах Географічного товариства України, Всесоюзній науково-практичній конференції "ґрунтозахисна технологія поливу і підвищення протипаводкового захисту" (Пушино, 1990), Всесоюзній науковій конференції "Ерозіознавство: теорія, експеримент, практика" (Москва, 1991), III "Європейській конференції з Географічних інформаційних систем EGIS'92 (Мюнхен, 1992), міжнародній науковій конференції "Зрошувальні меліорації-їх розвиток, ефективність і проблеми" (Херсон, 1993), Українсько-американській науково-практичній конференції (Київ, 1993), Республіканській науковій конференції "Екологічне та соціально-економічне обґрунтування регіональних схем раціонального природокористування" (Мінськ, 1993), науково-практичній конференції "Екологічні проблеми Одеського регіону та їх рішення" (Одеса, 1994), VI Європейській конференції з

Географічних інформаційних систем EGIS/MARI'94 (Париж, 1994), міжнародному симпозиумі "Зустріч Схід-Захід, Північ-Південь щодо інженерних методів річкової гідрології та філософії проектування" (Санкт-Петербург, 1994), міжнародній науково-практичній конференції "Ерозія ґрунтів і методи боротьби з нею" (Кишинів, 1995). Результати роботи обговорювалися на конференціях науково-викладацького складу Одеського держуніверситету (1986-1994).

**Публікації.** На тему дисертації опубліковано 52 роботи, в тому числі монографія і авторське свідцтво на винахід.

**Особистий внесок автора в роботу.** Теоретичні дослідження просторових змін скилового ерозійного процесу, обґрунтування удосконалення емпіричних моделей змиву ґрунту, обґрунтування та практична реалізація детальної теоретичної моделі скилового ерозійно-аккумулятивного процесу, розробка методик просторово-часової оцінки ерозійної небезпеки богарних та зрошуваних земель, в тому числі, з використанням технології Географічних інформаційних систем виконані автором самостійно. Польові обстеження наслідків ерозійної діяльності в Одеській області та дослідження зміни водопроникнення та протиерозійної стійкості ґрунтів за методом штучного дощування на зрошувальних системах півдня України і Ростовської області Російської Федерації проведені під керівництвом і за участю автора. Методика оптимізації ерозійної системи агроландшафту розроблена спільно з іншими авторами комп'ютерної системи агроландшафтного проектування. Обґрунтування алгоритма розрахунку гідрометеорологічного фактора зливового змиву виконаносумісно з С.Г.Чорним.

Автор висловлює глибоку вдячність доктору географічних наук, професору, академіку Академії інженерних наук України Г.І. Швєбсу, багаторічна спільна робота з яким вплинула на формування наукових поглядів автора, за критичні зауваження і поради, які сприяли успішному завершенню роботи, а також співробітникам кафедри фізичної географії і природокористування Одеського державного університету ім. І.І.Мечникова, які брали участь в проведенні польових досліджень і обробці матеріалів, насамперед, М.І.Ісакову, В.Д.Ковтуну, А.Т.Урусову і програмістам В.С.Кіртку та М.Б.Іванько, які виконали під керівництвом автора роботу по програмній реалізації моделей скилового ерозійного процесу.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, заключення, списку літератури і додат-

ку, викладена на 281 сторінці друкованого тексту, містить 27 малюнків і 28 таблиць. В додатку представлено 10 таблиць (28 сторінок). Список літератури нараховує 352 найменування, з них 81-латиницею.

У першому розділі дисертації представлені класифікація, аналіз та оцінка сучасних підходів до розрахунку характеристик змиву ґрунту. Другий розділ присвячений обґрунтуванню принципів розробки моделей скилового ерозійно-акумулятивного процесу, враховуючих закономірності змінення його характеру і інтенсивності вдовж скилу в умовах нестационарного режиму зливого замулоутворення, на базі емпіричного підходу. У третьому розділі представлені обґрунтування, розробка і апробація детальної теоретичної моделі ерозійно-акумулятивного процесу. У четвертому розділі розглянуті методичні принципи вирішення завдань щодо просторово-часової оцінки і картографування ерозійної небезпеки богарних та зрошуваних земель, у тому числі і на базі ГІС-технології. У п'ятому, заключному, розділі розглянуті питання оцінки протиерозійної стійкості агроландшафтів і обґрунтування раціонального використання земельних ресурсів ерозійно-небезпечних територій з використанням метода імітаційного моделювання і геоінформаційних технологій.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

##### Сучасні підходи до моделювання поверхневої скилової ерозії.

З точки зору аналізу і оцінки сучасних підходів до моделювання скилового ерозійного процесу як основи рішення завдань з оптимізації агроландшафтів представляється доцільним розділити існуючі моделі поверхневої скилової ерозії на дві великі групи-емпіричні та теоретичні. Емпіричні моделі цілком безперечно поділяються на два рівні. Емпіричні моделі першого рівня назвемо формально-статистичними. Це моделі, які одержані в результаті обробки емпіричних даних на основі формально-статистичного підходу і представляють собою рівняння множинної регресії. До формально-статистичних моделей слід віднести одну з перших моделей змиву, яка була запропонована в 1940 р. А.У.Цінгом (Zingg, 1940), прообраз відомого "Універсального рівняння втрат ґрунту"-формулу Г.У.Масгрейва (Musgrave, 1947), формули залежності змиву ґрунту від довжини та уклону скилу В.С.Федотова і Д.Д.Германюка

(Федотов, Германюк, 1971), формулу "зносу ґрунту" А.С.Рачінскаса (Рачінскас, 1987), "математично-статистичну модель втрат ґрунту", розроблену в Українському науково-дослідному інституті охорони ґрунтів (А.Б.Лавровський та ін. 1987), формулу В.А.Білолипського (Білолипський та ін., 1986) та деякі інші. Емпіричні моделі другого рівня назвемо фізико-статистичними. Вони відрізняються від моделей першого рівня прагненням до найбільш можливо повного обліку апріорних (теоретичних) знань про процес, що моделюється. До групи фізико-статистичних емпіричних моделей відноситься велика кількість достатньо різних моделей: найбільш відома в світі модель змиву-Універсальне рівняння втрат ґрунту, або рівняння Вішмейєра-Сміта (Wischmeier, Smith, 1956, 1978) і його модифікації, логіко-математична модель змиву Г.І.Швебса (Швебс, 1974), модель змиву, розроблена І.К.Срібним (Срібний, 1977, 1989), формула Г.П.Сурмача (Сурмач, 1979), "модель єдиного ерозійно-аккумулятивного процесу" Є.А.Гаршиньова (Гаршиньов, 1990) та деякі інші. Незважаючи на достатньо різні підходи до їх обґрунтування і різний рівень детальності, всі вони мають мультипликативну структуру, являючись добутком факторів гідрометеорологічних, ґрунтових, рельєфних та агротехнічних умов, саме тих, які на думку Г.І.Швебса (Швебс, 1983) повинні входити в розрахункову залежність, необхідну для проведення земле-впорядкувального проектування, оцінки ерозійної небезпеки окремих ґрунтових ареалів і смугових ландшафтних структур:

$$W = k_p K_k K_{гр} K_{рел} K_a \quad (1)$$

де  $W$ -середній модуль змиву ґрунту,  $k_p$ -емпіричний коефіцієнт;  $K_k$ -фактор гідрометеорологічних (кліматичних) умов;  $K_{гр}$ -фактор ґрунтових умов;  $K_{рел}$ -фактор рельєфних умов;  $K_a$ -фактор агротехнічних умов.

Власне емпіричні моделі в нинішній час рекомендуються до використання в проектуванні протиерозійних заходів та при рішенні інших питань, пов'язаних з використанням земельних ресурсів ерозійнонебезпечних територій на Україні та в інших країнах. Однак, область застосування формально-статистичних моделей обмежена умовами, для яких вони побудовані. Враховуючи те, що в Україні та інших колишніх республіках Радянського Союзу немає достатньої кількості однорідних даних стаціонарних спостережень і формально-статистичні моделі розроблені тут за

даними штучного дощування малих стокових площадок, існують серйозні проблеми з екстраполяцією отриманих залежностей на реальні умови. Найбільш слабким місцем фізико-статистичних моделей водної ерозії є рельєфний фактор, що описує зміну характеру та інтенсивності ерозійного процесу по довжині схилу, оскільки обґрунтування його структури і параметрів засновується на концепції "площинного змиву ґрунту", розробленої за даними спостережень на стокових або стоково-ерозійних площадках дуже обмеженої довжини—як правило 20–40 м.

Загальним виглядом функції, яка відображає в емпіричних моделях змиву вплив рельєфних умов ерозійно-аккумулятивного процесу являється вираз:

$$K_{\text{рел}} = f_1(I) f_2(L) \quad (2)$$

де:  $f_1(I)$ —фактор уклону, який являє собою частіше всього степенну функцію середнього уклону схилу ( $I^m$ );  $f_2(L)$ —фактор довжини схилу, який звичайно являє собою степенну функцію відстані від вододілу ( $L^p$ );  $m$ ,  $p$ —показники степеня. Залежності інтенсивності змиву від уклону, які використовуються в найбільш відомих емпіричних моделях, близькі поміж собою. Інакше стоїть справа з залежністю модуля змиву від довжини схилу. Показник степеня при довжині схилу  $p$  в моделях різних авторів змінюється від (-1.7) до 2.6, що не можна признати допустимим.

До теоретичних моделей віднесемо моделі, які опираються на ту чи іншу теоретичну (звичайно гідравлічну) модель стікання або наносоутворення, яка в явному вигляді описує процес, що моделюється. В зв'язку з цим вони значно більш гнучкі, ніж інші моделі, не мають просторових обмежень і потенційно мають значно більші можливості як інструмент оптимізації ерозійної системи агроландшафту. Однак, існуючі теоретичні моделі дуже істотно відрізняються за ступенем детальності, обґрунтованості і повноти (Корнев, 1937; Казаков, 1940; Хортон, 1948; Костяков, 1961; Швебс, 1958; Сластіхін, 1964; Мірцхулава, 1970, Bennett, 1974; Hjelmfelt et al., 1975; Comura, 1976; Лідов, 1981; Beasley et al., 1982; Park et al., 1982; Бефані, 1986; Nearing et al., 1989; Кондратьев, 1989; Сухановський, 1990; Schmidt, 1991; Смагін, 1993; De Roo et al., 1994 та інші). Серед них є одночленні формули змиву, якими являються перші теоретичні моделі ерозійного процесу, розроблені Я.В.Корневим, Р.Е.Хортоном, А.Н.Ко-

стяковим і сучасні складні динамічні моделі, такі як, наприклад, ерозійна модель WEPP, яка розроблюється в США (Nearing et al., 1989), або Лімбургська ерозійна модель-LISEM, розроблена в Нідерландах (De Roo et al., 1994).

Що стосується одночлених теоретичних моделей (формул змиву), то вони вже не можуть задовольнити сучасні вимоги. Сучасний рівень моделювання ерозійних процесів характеризується прагненням врахувати нестационарний характер процесів схилового стоку і водної ерозії на основі використання системи рівнянь кінематичної хвилі для опису схилового стікання та балансу (нерозривності) для твердої фази. Математичний базис моделювання звичайно утворює система трьох рівнянь, які записані для схилу одиничної ширини:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial (C(x) y^{n+1})}{\partial x} = F(x, t)$$

$$v = C(x) y^n \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_p}{\partial x} + (1 - \gamma) m_p \frac{\partial z}{\partial t} = 0$$

де:  $y$ -глибина рівномірно розподіленого по ширині схилу потоку;  $v$ -середня швидкість течії води в живому розрізі;  $C$ -швидкісний коефіцієнт;  $F(x, t)$ -функція, яка в період стокоутворення характеризує інтенсивність цього процесу- $h(x, t)$ , а після його закінчення-інтенсивність інфільтраційних втрат стоку- $k(x, t)$ ;  $\rho$ -середня в живому розрізі мутність потоку;  $m_p$ -щільність часток наносів;  $\gamma$ -пористість верхнього шару ґрунту;  $q_p$ -витрати наносів;  $n$ -гідралічний параметр;  $z$ -відмітка поверхні схилу;  $x$ -відстань від вододілу;  $t$ -час від початку стокоутворення.

Важливими складовими теоретичних моделей є модулі, що описують механізм руйнування ґрунту краплинами дощу і потоком та транспорту наносів, які доповнюють базову систему рівнянь (3). Керівна роль розробці цих моделей, зокрема, відводиться в межах проекту прогнозу водної ерозії (WEPP) Департаменту сільського господарства США, який виконується з 1985 року. В основі ерозійної моделі WEPP знаходяться концепції про роль промоїнного і міжпромоїнного джерел намулів та їх окремого обліку (Meyer, Wischmeier, 1969; Foster, Meyer, 1972; Meyer et al., 1975).

Приймається, що інтенсивність міжпромісної ерозії пропорційна інтенсивності дощу, а в основі моделей відокремлення і транспорту наносів потоком, по-суті, лежить теорія волочиння, яка була запропонована щодо руслових наносів ще П.Ф.Дюбуа (Du Bois, 1879)-теорія їх пропорційності швидкості потоку. В рамках цього ж підходу виконана розробка моделей ерозійного процесу також С.А.Кондратьєвим (Кондратьев, 1989), В.Ю.Смахтіним (Смахтін, 1993) та рядом інших авторів.

Необхідно, однак, відмітити, що поділ поверхнево-схилової ерозії на промісну і міжпромісну, незалежних одна від іншої представляє занадто грубу схематизацію процесу, яка перечить емпіричним даним. Крім того, реалізація даного підходу потребує детальних даних про будову струмкової сітки та про крупність схилових наносів, які, як правило, відсутні.

Рішення системи (3) звичайно виконується чисельними методами. В нинішній час накопичено значний досвід реалізації кінематичної моделі схилового стоку (Woolhiser, 1976; Кучмент та ін., 1983; Рум'янцев, Кондратьев, 1979 та ін.). При цьому виявлено, що при означених умовах модель дає рішення у вигляді розривних хвиль, що створює значні труднощі в практичній реалізації цього підходу. Для одержання узагальнених рішень Л.С.Кучмент (Кучмент та ін., 1983) пропонує штучне введення в диференціальне або різностне рівняння таких членів, при яких ці рівняння мають гладке рішення, або представляти рівняння нерозривності в інтегральній формі. Однак, і в тому, і в іншому випадках рішення не являється тривіальним. Чисельна реалізація системи (3) потребує також великих витрат машинного часу, що робить неможливим практичне використання моделі для рішення широкого кола задач. В зв'язку з цим, вельми перспективними являються дослідження по наближеному аналітичному рішенню системи рівнянь кінематичної хвилі (Бефані, 1949, 1956, 1986; Світличний, 1977; Кондратьев, 1989; Michand, Sorooshian, 1994 та ін.).

#### Принципи розробки моделі схилового ерозійно-аккумулятивного процесу на основі емпіричного підходу.

Водноерозійний процес - це діалектична єдність процесів руйнування, переміщення та акумуляції, які змінюють один одного в часі та просторі. Єдність розмиву, переносу та акумуляції в процесі схилової ерозії підкреслювали, зокрема, Г.В.Лопатін, М.

І.Маккавеев, Г.І.Швебс та ін.. Щільний зв'язок ерозії і акумуляції визначає на думку А.І.Скоморохова "зворотньо-поступальний" розвиток флювіального рельєфу (Скоморохов, 1990). Одним з проявів такого розвитку, на наш погляд, є чергування зон ерозії і акумуляції на схилі та їх зміна в часі. Результатом цього являється, насамперед, преривність процесу змиву, в тому числі відсутність безперервного від вододілу до підніжжя схилу потоку наносів під час зливи. Ерозійний процес-це процес багаторазового перевідкладення наносів при якому за межі схилу в конкретній реалізації виноситься лише деяка частина матеріалу, що перевідкладається.

Чергування зон ерозії і акумуляції на схилах неминуче приводить до формування хвильового профілю схила, тобто чергуванню ділянок більшої і меншої крутизни, яке, в свою чергу, впливає на характер і інтенсивність ерозійного процесу в різних частинах схилу-на випуклих ділянках інтенсифікується змив, на увігнутих-відбувається часткова акумуляція наносів. Так реалізується властивість, яка називається авторегуляцією (або саморегуляцією) флювіального рельєфу (Поздняков, Черваньов, 1990) і яка є проявом в межах схилової ланки глобального ерозійно- акумулятивного процесу принципу взаємодії потоку і русла, вперше сформульованого М.А.Великановим (Великанов, 1958).

Аналіз будови схилів території Українського Причорномор'я і південних районів Республіки Молдова, виконаний за великомасштабними топографічними картами, показав, що макроформа схилів добре апроксимується степенною функцією відстані від вододілу з показником степеня, який в переважній більшості в випадків перевищує одиницю (становить в середньому 1.3-1.8), що свідчить про випуклу форму повздожнього профілю. Однак, одноманітно випуклим в більшості випадків є лише сама верхня частина схилу. Нижче має місце лише чергування ділянок різної крутизни.

Аналіз схилової мезохвилястості за матеріалами детального (з шагом 10-30 м) нівелювання повздожніх профілей схилів з застосуванням кореляційного аналізу показав, що характерний розмір хвилястості змінюється від декількох метрів до 100-150 м (в більшості випадків). Очевидно, характер повздожнього профілю в кожному конкретному випадку є функція сумісного впливу множини факторів, серед яких довжина, середній уклон схилу, його форма, ґрунтові, фітоценотичні та кліматичні умови, а також

характер використання схилу. Результат сумісного впливу досить великого числа різних факторів повинен бути різним. При зміні одного або декількох з цих факторів відповідно принципу Ле Шательє повинна відбуватися зміна характеру хвилястості, мабуть, саме через цей механізм і забезпечується стійкість схилів як системи. З цього виходить однозначний висновок про принципову неможливість розповсюдження просторових закономірностей ерозійного процесу установлених на ділянках схилу довжиною 20-40 м на увесь схил.

Цей теоретичний висновок повністю підтверджено аналізом фактору рельєфних умов (2) з використанням даних детальної з'йомки змін інтенсивності ерозійного процесу на схилах довжиною від 175 м до майже 2000 м. При цьому були залучені дані літературних джерел (Соболев, 1948, 1956; Заславський, 1966; Константинов, 1987; Д'яконов, 1975, 1977; Полуектов, 1989), а також матеріали польових обстежень і детальної інструментальної з'йомки струменистих розмивів в Білгород-Дністровському і Овідіопольському районах Одеської області, проведених автором, які охоплюють усі характерні макроформи схилів-випуклі, випуклоувігнуті і складні. Розроблено методичні основи аналізу таких даних, які передбачають використання сполучення методів множинної лінійної регресії та оптимізації.

Виконаний аналіз дозволив зробити однозначний висновок, що рельєфний фактор вигляду (2) не може бути використований на схилах достатньо великої довжини. Область його застосування-лише привододільна вирівняна ділянка схилу довжиною, як правило, до декількох десятків метрів.

Для обґрунтування вигляду рельєфного фактора емпіричних моделей ерозійного процесу, здібного описувати зміну не тільки інтенсивності, але й характеру по довжині схилу, використано підхід, запропонований Г.І.Швебсом (Швебс, 1974). В його основі лежить відома формула визначення середньозначення функції:

$$\bar{W}(L) = \frac{1}{L} \int_0^L W(x) dx, \quad (4)$$

де:  $\bar{W}(L)$ -середній модуль змиву на схилі до створу, розташованому на відстані  $L$  від вододілу;  $W(x)$ -модуль змиву в довільному створі, розміщеному на відстані  $x$  від вододілу.

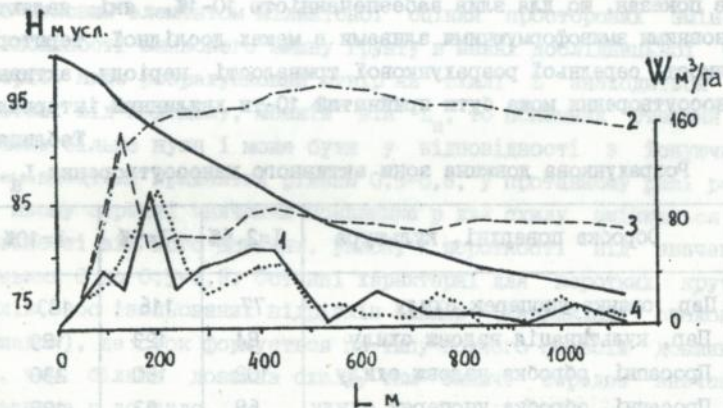
Після диференціювання (4) і підстави в нього  $\bar{W}(L)$  по (1) отримано вираз для модуля змиву на даній відстані від вододілу

(L) при довільних формі повздожнього профіля, характері ґрунтового покритву і використанні схилу:

$$W(L) = (p+1) \bar{W}(L) + K_K J(L) L^{p+1} K_a \frac{d I^m(L)}{dL} + K_K I^m(L) L^{p+1} K_a \frac{d J(L)}{dL} + K_K J(L) I^m(L) L^{p+1} \frac{d K_a}{dL} \quad (5)$$

Із виразу (5) випливає, що навіть для прямого схилу необхідно враховувати вплив зміни протиерозійної стійкості і агротехнічних умов на схилі, описаних в моделі (5) двома останніми додатками правої частини, які можуть бути як позитивними, так і негативними. Для схилів же змінної крутизни, якими при уважному розгляданні являються всі схили, більше значення має знак зміни уклону. На випуклих ділянках в відповідності з (5) змив збільшується, а на увігнутих-зменшується. Модель (5) дозволяє провести оцінку не тільки змиву, але і акумуляції на схилі, що перетворює емпіричну модель змиву в модель схилового ерозійно-акумулятивного процесу.

Функція рельєфних умов моделі (5) значно краще ніж моделі типу (2) описує зміни інтенсивності ерозійно-акумулятивного процесу по довжині схилу (Мал.1), однак оптимальне значення показника  $p$  для різних схилів не є постійним і також змінюється.



Мал. 1. Повздожній профіль схилу і зміни по його довжині фактичних змивів фактичного-1 і розрахованого за моделлю АНУ при  $p=0,5$ -2,  $p=0-3$  і моделі (5)-4.

Як показав аналіз формування зливового стоку і наносоутворення на схилах в умовах степу і лісостепу України, вирішальне значення на характер збільшення по довжині схилу інтенсивності змиву ґрунту має тривалість періоду часу всередині зливи, на протязі якого відбувається формування основного об'єму змиву ґрунту, названого "періодом активного наносоутворення". В тому випадку, коли період активного наносоутворення більше, ніж час схилового добігання, то модуль змиву повинен монотонно збільшуватися вниз по схилу і  $p > 0$ , так як формування стоку на всьому схилі по типу "повного" стоку (Бефані, 1949). При цьому глибина, а отже і швидкість потоку монотонно збільшується з віддаленням від вододілу. В іншому випадку в нижній частині схилу сток формується по типу "неповного" стоку, при якому гідравлічні характеристики потоку не залежать від відстані від вододілу, отже інтенсивність змиву не збільшується вниз по схилу ( $p = 0$ ).

Оцінка внесення різних частин злив в наносоутворення виконана з використанням модифікованого варіанту гідрометеорологічного фактору зливового змиву ( $K_{ГМ}$ ) Г.І.Швебса, який є комплексним показником, що характеризує ерозійний вплив краплин дощу і зформованого схилового стоку та моделі розрахункових злив забезпеченості 1-10%, які були побудовані з використанням ординат середньої кривої редукції зливових опадів (Посібник ..., 1984; Рекомендації ..., 1985). Аналіз результатів виконаних розрахунків показав, що для злив забезпеченості 10-1%, які являються основними змивоформуєчими зливами в межах дослідної території, в якості середньої розрахункової тривалості періоду активного наносоутворення може бути прийнятий 10-ти хвилинний інтервал.

Таблиця 1

Розрахункова довжина зони активного наносоутворення  $L_a$ .

Обробка поверхні, культура	I=2.5%	I=5%	I=10%
Пар, оранка упоперек схилу	77	116	183
Пар, культивация вздовж схилу	84	123	189
Просапні, обробка вздовж схилу	102	150	230
Просапні, обробка упоперек схилу	58	83	128
Зернові суцільної сівби	44	65	100
Дворічна густа трава	52	75	109

В таблиці 1 представлені орієнтовні значення довжини зони активного наносутворення ( $L_a$ ) для розрахункової зливи 5% забезпеченості на ріллі для півдня лісостепу і степу України. Розрахунки виконані по формулі, отриманій з використанням формули швидкості скилового стікання І.К.Срібного (Срібний, 1977):

$$L_a = 0.854 m_0^{3/2} (\bar{r}_{10, P\%} \phi b_c I_a)^{1/2}, \quad (6)$$

де  $L_a$  - довжина зони активного наносутворення, м;  $\bar{r}_{10, P\%}$  - найбільша середня за 10 хвилин інтенсивність дощу розрахункової забезпеченості P%, мм/хв;  $m_0$  - коефіцієнт шорсткості поверхні;  $\phi$  - коефіцієнт стоку;  $b_c$  - середня ширина водозборів тимчасової руслової сітки, м;  $I_a$  - середній уклон по довжині  $L_a$ , %.

Як видно із таблиці 1, навіть при уклоні 10% (близько  $6^\circ$ ) довжина зони активного наносутворення складає для орних земель 100-230 м. При найбільш характерних для ерозійно-небезпечних земель Українського Причорномор'я схилах порядку 50%, ця довжина змінюється в межах 65-150 м. Порівняння цих цифр із середньою довжиною схилів, яка змінюється від 450-600 м на півночі до 1200-1900 м на півдні розглянутої території, показує що зона активного наносутворення в більшості випадків складає лише деяку (меншу) частину схилу.

Розрахунок зони активного наносутворення, таким чином, є обов'язковим елементом кількісної оцінки просторових змін інтенсивності зливого змиву ґрунту в межах дослідницької території. Якщо розрахунковий ствір на схилі  $L$  знаходиться на відстані від вододілу, меншій ніж  $L_a$ , то показник ступеня р істотно більше нуля і може бути у відповідності з існуючими рекомендаціями прийнятий рівним 0,5-0,6, у протилежному разі  $r=0$ . При цьому середні значення показника  $r$  для схилу змінюються в залежності від його довжини, уклону і шорсткості від значень, близьких 0 до 0,5-0,6. Останні характерні для коротких крутих схилів, або ізольованих відрізків схилів (наприклад, стокових площадок), де сток формується по типу повного по всій довжині. Але, чим більша довжина схилу, тим ближче середнє значення показника  $r$  до нуля.

Емпіричні дані показують також, що при визначених умовах показник  $r$  може істотно перевищувати 0,5-0,6. Значення  $r$  з діапазоном 0,5-0,9 отримані, наприклад, за даними спостережень на

деяких стоково-ерозійних станціях США (Гусри, штат Оклахома, та Бесані, штат Монтана) (McCool et al., 1989). Г.А.Ларіонов відзначає, що показник степеня при довжині на коротких схилах може перевищувати 1, і навіть досягати значень 3-4. Однак, виконаний аналіз показав, що отримані на основі обробки емпіричних даних значення показника степеня  $p$ , які перевищують 0,5-0,6, або відображають локальні закономірності, розповсюдження яких на достатньо протяжні схили недопустиме, або являються наслідком помилок методичного характеру, пов'язаних з недостатнім врахуванням особливостей характеру емпіричних даних.

На основі проведених досліджень просторових закономірностей схилового ерозійно-аккумулятивного процесу виконана модифікація логіко-математичної моделі зливого змиву Г.І.Швебса, модель елементарного наносутворення якої найбільш теоретично та інформаційно забезпечена відповідно умов степової та лісостепової зон України. Основні розрахункові вирази модифікованої моделі мають вигляд:

При  $L > L_a$ :

$$W(L) = K_{ГМ} f_p f_a \left[ 1.5 \bar{J}(L_a) \bar{I}^m(L_a) L_a^{0.5} + j(L) L \frac{d\bar{I}^m(L)}{dL} + \bar{I}^m(L) L \frac{dj(L)}{dL} + j(L) \bar{I}^m(L) L \frac{d(f_p f_a)}{dL} \right] \quad (7)$$

При  $L < L_a$ :

$$W(L) = K_{ГМ} f_p f_a \left[ 1.5 \bar{J}(L) \bar{I}^m(L) L^{0.5} + j(L) L^{1.5} \frac{d\bar{I}^m(L)}{dL} + \bar{I}^m(L) L^{1.5} \frac{dj(L)}{dL} + j(L) \bar{I}^m(L) L^{1.5} \frac{d(f_p f_a)}{dL} \right] \quad (8)$$

де  $W(L)$  - модуль зливого змиву ґрунту (т/га) на відстані  $L$  (м) від вододілу;  $K_{ГМ}$  - гідрометеорологічний фактор зливого змиву;  $f_p$  - фактор рослинності;  $f_a$  - фактор спеціальних агротехнічних протиерозійних заходів;  $\bar{I}(L)$  - середній уклон схилу до даного створу, %;  $\bar{J}$  - середня відносна змиваемість ґрунту до даного створу;  $I(L)$ ,  $j(L)$  - відповідні значення в даному створі;  $L_a$  - робоча довжина зони активного наносутворення (м), в якості якої з метою врахування зміни факторів ерозійного процесу вниз по схилу приймається ділянка схилу, яка забезпечує максимальне значення першого доданку в квадратних дужках виразу (7) - або

привододільна, або примикаюча до розрахункового створу, довжина якої визначається за формулою (6).

Гідрометеорологічний фактор зливого змиву  $K_{ГМ}$  для конкретного дощу на основі виконаного теоретичного аналізу і експериментальної перевірки з використанням матеріалів спостережень Молдавської водно-балансової станції рекомендується визначати за формулою:

$$K_{ГМ} = 2.6 \cdot 10^{-6} \left[ \sum_{i=1}^N (1 + 17.5 \lambda r_i) (r_i - r_{смi})^{2.7} \Delta t_i + \sum_{\xi=1}^{M+1} (1 + 17.5 \lambda r_{\xi}) \lambda^{2.7} (r_{\xi-1} - r_{см\xi-1})^{2.7} \Delta t_{\xi} \right], \quad (9)$$

де:  $r_i$  - інтенсивність дощу в  $i$ -му розрахунковому інтервалі, для якого  $r > r_{см}$ , мм/хв;  $r_{смi}$  - змивоутворююча інтенсивність для  $i$ -го розрахункового інтервалу, визначена відповідно з рекомендаціями Г.І. Швебса (Швебс, 1974), мм/хв;  $r_{\xi}$  - інтенсивність дощу для інтервалу, для якого  $r < r_{см}$ , мм/хв;  $\Delta t$  - довжина розрахункового інтервалу, хв;  $\lambda$  - коефіцієнт, який враховує зменшення транспортуючої здібності потоку на протязі спаду;  $N$  - кількість стокоутворюючих інтервалів дощу;  $M$  - кількість тактів стокоутворення.

Розроблено алгоритм і виконана програмна реалізація моделі (7)-(9) для ІВМ сумісних персональних комп'ютерів.

#### Моделивання схилового ерозійно-аккумулятивного процесу на основі теоретичного підходу.

Адекватне рішення завдань по обґрунтуванню використання ерозійнонебезпечних земель, пов'язаних з оцінкою переміщення наносів вниз по схилу і винесення твердого матеріалу, а з ним-поживних речовин, агрохімікатів, і різноманітних забруднювачів в гідрографічну сітку, неможливо в рамках емпіричного підходу. Тут необхідне використання теоретичних ерозійно-гідрологічних моделей, які детально описують формування як твердого, так і рідкого стоку, при чому ступень детальності визначає можливості моделі як інструменту досліджень і проектування.

Найбільш перспективним в цьому відношенні являється використання в якості теоретичного базису моделі системи рівнянь (3). Ця система повинна бути доповнена моделлю елементарного наносоутворення. Як показано в розділі 1, в основі моделей елементарного наносоутворення, що використовуються в ерозійній мо-

делі WEPP та інших західних моделях лежать концепції відділення і транспорту наносів потоком, сформульовані У.Х.Уїлмейером, Г.Р.Фостером та Л.Д.Мейером. Запропоновані реалізації цих концепцій (Кіркбі, 1984; Nearing et al., 1989; Кондратьев, 1989; Schmidt, 1991 та ін.) мають ряд нерегламентованих параметрів і вимагають детальних даних про крупність скилових наносів, що дуже обмежує практичні можливості даного підходу. В зв'язку з цим в якості робочої моделі елементарного наносоутворення обгрунтована модель, яка опирається на дослідження процесу наносоутворення методом штучного дощування (Швебс, 1974) і в зв'язку з цим добре інформаційно забезпечена:

$$q_p = k_p j_p (1 + 1.02 \cdot 10^6 A r) q^{2.7}, \quad (10)$$

де  $q_p$  – витрати наносів через одиницю ширини скилу, кг/с/м;  $j_p$  – часткова характеристика відносної змиваемості (Швебс, 1974);  $q$  – витрати води, м<sup>3</sup>/с/м;  $A$  – коефіцієнт ґрунтозахисної ефективності рослинності;  $r$  – інтенсивність дощу;  $k_p$  – емпіричний коефіцієнт.

Модель елементарного наносоутворення (10) має добрі експериментальні обґрунтування. Однак, враховуючи ті обставини, що при штучному дощуванні малих площадок відповідно теорії глибина стікання обмежена інтенсивністю дощу, вона не враховує особливості наносоутворення та транспорту наносів при значних глибинах, які в декілька разів перевищують діаметр краплин, тому модель елементарного наносоутворення (10) повинна бути доповнена моделлю транспортуючої здібності потоку. В якості такої моделі застосоване рівняння, що ґрунтується на дослідженнях Г.Р.Фостера і Л.Д.Мейера (Foster, Meyer, 1972), П.В.Алонсо (Alonso et al., 1981) та С.П.Фінкнера (Finkner, 1989):

$$q_{pm} = k_t (\alpha u f_s / f I)^{3/2}, \quad (11)$$

де  $q_{pm}$  – транспортуюча здібність потоку, кг/с/м;  $k_t$  – транспортний (емпіричний) коефіцієнт;  $\alpha$  – питома вага води, кг/м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $u$  – глибина потоку, м;  $f_s$  – коефіцієнт шорсткості Дарсі-Вейсбаха для вирівненої позбавленої рослинності поверхні ґрунту;  $f$  – загальний коефіцієнт гідравлічних опорів для даних умов.

Система рівнянь (3), (10), (11), таким чином, складає теоретичний базис "профільної" (або двовірної) динамічної моделі ерозійно-аккумулятивного процесу, яка з однієї сторони опирається на досягнутий рівень досліджень скилового стоку і наносоут-

ворення, а з другої - враховує сучасний стан інформаційного забезпечення ерозійно-гідрологічного моделювання. Принципіальне значення при цьому також мають вибір моделі стокоутворення, засоба рішення системи диференціальних рівнянь і методи обліку струмкового характеру схилового стікання.

В якості основи моделі стокоутворення використана точкова модель передрахунку притоку зливових вод на малих водозборах лісостепової та степової зон України і Молдови, розроблена в Одеському гідрометеорологічному інституті з використанням матеріалів спостережень стокових і воднобалансових станцій, розташованих в межах дослідницької території, а також даних польових експериментальних дослідів вбирання води в ґрунт за методом штучного дощування (Світлична, 1984). В основі її лежить рівняння водного балансу схилу в цілому за паводок (Бефані, 1958):

$$Y = S_T - P_{\text{сп}} \quad (12)$$

де:  $Y$  - шар стоку за паводок, мм;  $S_T$  - шар стокоутворення за дощ протягом  $T$ , мм;  $P_{\text{сп}}$  - шар втрат на спаді, мм. Стокоутворення тут являє собою різницю опадів та сумарних втрат за період дощу:

$$S_T = X - P_V - P_S - P_f \quad (13)$$

де:  $X$  - шар атмосферних опадів за дощ, мм;  $P_V$  - перехват опадів рослинністю, мм;  $P_S$  - затримання в мікродепресіях поверхні, мм;  $P_f$  - втрати на інфільтрацію під час дощу.

Дана модель стокоутворення являється моделлю із зосередженими параметрами, призначеною для передрахунку сумарного шару стокоутворення на схилах в цілому за дощ, хоча розрахунок основного і найбільш важко визначного компоненту втрат - інфільтраційних - проводиться за інтервалами часу, що створе передумови для розробки на її основі динамічної моделі. Трансформація в динамічну моделі перехвату опадів рослинністю не викликає труднощів, так як остання містить в своїй структурі координату часу і не залежить від інших складових втрат. Для оцінки втрат дощових вод на затримання в місткостях мікрорельєфу на протязі дощу, використано слідуєчий алгоритм. На початку розраховується сумарний об'єм затримання за дощ з використанням моделі експоненціального типу (Бефані, 1983), а потім визначається об'єм затримання і для кожного розрахункового інтервалу часу, починаючи з першого, як надлишок опадів над сумою втрат на пе-

рехват рослинності і інфільтрацію, поки сума цих надлишків не стане рівною розрахунковому об'єму утримання за дощ, після чого поверхневе затримання приймається рівним 0. На протязі спаду після закінчення дощу, а також в його перерви рахунку підлягають тільки інфільтраційні втрати. Однак, при цьому повинна враховуватися концентрація скилового стоку в повздовжніх пониженнях. У відповідності з рекомендаціями А.М.Бефані (Бефані, 1949, 1958) прийнятий лінійний закон зменшення коефіцієнта поперечної концентрації скилового стікання в ході спаду. В якості робочої гіпотези в модель стокоутворення введена залежність установленної інтенсивності інфільтрації від ступеня еродованості ґрунту, сформульована на основі узагальнення літературних даних (Черемісінов, 1968; Швебс, 1974; Ігошин та ін., 1985), а також матеріалів власних польових дослідів.

Розроблено алгоритм реалізації моделі стокоутворення, який забезпечує розрахунок ходу стокоутворення по довжині скилу, з заданим шагом  $\Delta L$ . При цьому для інтервалів дощу без стокоутворення, слідуючих за тактами стокоутворення, передбачена взаємодія із моделлю стікання на основі т.з. "моделі спаду скилового стоку". В основу моделювання скилового стікання покладене аналітичне рішення системи (3). В загальному вигляді система (3) не має аналітичного рішення. Однак, для ряду окремих випадків, достатньо добре апроксимуючих реальні умови, особливо для фази стокоутворення, рішення відомі (Бефані, 1949; Singh, Woolhiser, 1976, Світличний, 1977; Румянцев, Кондратьев, 1988; De Lima et al., 1989 та ін.).

Для фази стокоутворення формування скилового стоку для скилу одиначної ширини в моделі кінематичної хвилі описується рівняннями:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial (C(x) y^{n+1})}{\partial x} = h(x, t)$$

$$v = C y^n, \quad (14)$$

де:  $h(x, t)$  - інтенсивність стокоутворення як довільна функція часу і відстані від вододілу.

Система рівнянь кінематичної хвилі (14) має два рішення в залежності від співвідношення між часом добігання до розглянутого розрізу на скилі  $t_c$  і часу з відпочатку стокоутворення  $t$  (Бефані, 1949; Woolhiser, 1976; Рум'янцеv, Кондратьев, 1988).

Якщо  $t > t_c$ , то в даному розрізі стік формується за типом повного стоку і глибина потоку визначається виразом:

$$y = \left\{ \frac{1}{C} \int_0^x h[\zeta, t(\xi)] d\xi \right\}^{\frac{1}{n+1}}. \quad (15)$$

Для тієї ж частини схилу, де формування стоку піде по типу неповного стоку ( $t_c < t$ ), глибина потоку чисельно рівна сумарному на даний момент часу шару стокоутворення

$$y = \int_0^t h(x, \theta) d\theta = S(x, t). \quad (16)$$

де  $S(x, t)$  - сумарний шар стокоутворення на момент часу  $t$ .

Рівняння нерозривності для фази спаду стоку з урахуванням прийнятої моделі динаміки коефіцієнта поперечної концентрації стоку на протязі спаду має вигляд:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial (C(x) y^{n+1})}{\partial x} = -\lambda \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) k. \quad (17)$$

де:  $\lambda$  - значення коефіцієнта концентрації схилового стікання на початку спаду;  $k$  - інтенсивність інфільтрації;  $\tau$  - тривалість спаду.

Інтегрування рівнянь кінематичної хвилі для фази спаду при  $n=0,5$  дало можливість отримати систему виразів, які описують динаміку схилового стоку на спаді.

Для врахування струмкового характеру схилового стікання використана методика, заснована на натурних даних про форму поперечного профілю ерозійних водоміїн на схилах. Показано, що перехід від виразів, які описують рівномірно розподілене по ширині схилу стікання, до виразів, що враховують його струмковий характер, може бути виконано шляхом введення до глибини потоку коефіцієнта, який є показником концентрації схилового стікання.

На основі проведених теоретичних досліджень розроблено алгоритм в основу якого покладено представлення процесу стокоутворення в вигляді послідовності змінних за часом квазістаціонарних станових і виконана (з М.Б.Іваньком) комп'ютерна реалізація динамічної моделі ерозійно-аккумулятивного процесу. Вхідними даними моделі являються координати розрахункового профілю схилу та ґрунтових ареалів на профілі, півнограми розрахункових злив, вологозапаси верхнього півметрового шару ґрунту, значення мак-

симальної вологості цього шару, установлені інтенсивності вбирання води в ґрунт, коефіцієнтів шорсткості поверхні, хвилястості мікрорусел і поперечної концентрації стоку. Комп'ютерна реалізація моделі складається з двох модулів, названих EXCESS і ERACC, які мають однотипний користувацький інтерфейс. Перший реалізує алгоритм розрахунку стокоутворення, другий - характеристик схилового стоку, змиву і/або акумуляції та транспорту наносів. Модуль EXCESS являється незалежним і може використовуватися самостійно для рішення різних задач, пов'язаних з оцінкою стокоутворення або його факторів. Модуль ERACC крім власних вхідних даних використовує результати розрахунку шарів стокоутворення, а також інтенсивності інфільтрації і перехвату рослинністю за розрахунковими інтервалами часу і простору.

Більшість параметрів моделі має цілком означене фізичне значення і являється або безпосередньо вимірюваними, або визначені незалежним чином. Значення параметрів моделей перехвату опадів рослинністю, поверхневого затримання, вбирання води в ґрунт, еродуєності ґрунтів одержано на основі узагальнення даних досліджень вітчизняних і закордонних дослідників (Линслей та ін., 1962; Черемісінов, 1968; Швобс, 1974, 1981; Бефані, 1975, 1982; Булавко, 1971; Петрова, 1978; Литовченко, 1986; Світлична, 1984; Ігошин, 1982; Ігошин та ін., 1985). Для визначення транспортного коефіцієнта  $K_t$  використані дані про екстремальні значення мутності на стокових площадках та схилових водозборах Молдавської (МВБС) та Велико-Анадольської (ВАВБС) водно-балансових станціях і Богуславської науково-дослідної гідрологічної лабораторії (БНДГЛ). Ідентифікація моделі виконана з використанням матеріалів спостережень на улоговині Плоскій за 1970-1981 рр., стоковій площадці N 15 за 1975-1981 рр. (БНДГЛ) і улоговині Сухій (ВАВБС) за 1977 р. Для верифікації моделі додатково використані матеріали спостережень на улоговинах Плоскій за 1983-1987 рр. та Сухій за 1976-1987 рр.

Верифікація моделі вироблялася в двох варіантах, які відрізняються один від одного способом задання вологості активного шару ґрунту. В першому випадку вона приймалася постійною по довжині схилу, в другому - змінною. Розрахунок зміни ґрунтової вологості проводили за методикою, що ґрунтується на дослідженнях Є.Н.Романової (Романова, 1976). Критерій якості перевірок розрахунків - відношення середньоквадратичної помилки переві-

рочних розрахунків до середньоквадратичного відхилення розрахункової характеристики-шару стоку або об'єму змиву з водозбору для першого варіанта розрахунків, прийнятого за основний, складає 0.28 та 0.31, відповідно, що характеризує точність розрахунків як добру.

Випробування моделі на декількох десятках реалізацій процесу випадання опадів з різною інтенсивністю, тривалістю, шаром та графіком на схилових водозборах із середнім уклоном від 1.5% до 15% і довжиною схилу від 140 м до 720 м показали надійність і стійкість роботи моделі-практично у всьому діапазоні можливих значень природних факторів процесу, що дає можливість використання її для рішення дослідницьких та практичних задач, пов'язаних з науковим обґрунтуванням використання ерозійнонебезпечних земель в природно-господарських умовах досліджуваної території.

**Методичні принципи застосування емпіричної моделі ерозійно-аккумулятивного процесу для рішення задач по просторово-часовій оцінці ерозійної небезпечності території.**

Розрахунок норми потенційного зливового змиву ґрунту є одним із центральних моментів розрахунку ерозійної небезпечності території. Звичайно це робиться з використанням середньобагаторічної величини (норми) кліматичного фактору. В тому випадку, якщо зв'язок між кліматичним (гідрометеорологічним) фактором та зливом лінійний, як це має місце в логіко-математичній моделі змиву ґрунту Г.І.Швебса, то такий підхід достатньо правомірний. Однак методика визначення норми кліматичного фактора зливної ерозії і гідрометеорологічного фактора в зв'язку з обмеженістю необхідних даних метеорологічних спостережень вимагає спеціального розгляду.

Розрахунок гідрометеорологічного фактора для конкретного дощу ведеться за формулою (9) з використанням півліограми даного дощу і добових сум опадів та середньодобових температур повітря за 100 попередніх діб. Річні значення гідрометеорологічного фактора зливового змиву визначаються як сума значень  $K_{ГМ}$  усіх стокоутворюючих дощів, які випали на протязі відповідного року. В зв'язку з цим довжина рядів річних значень  $K_{ГМ}$  для дослідницької території обмежується, головним чином, наявністю півліометричних даних. Так, довжина рядів річних сум  $K_{ГМ}$ , роз-

рахованих за описанов методиком, за даними спостережень на 10 метеостанціях території південно-західного Причорномор'я і 7 метеостанціях, розташованих в прилягаючих районах Республіки Молдова, змінюється від 10 років до 41 року, в середньому складає 26 років. В зв'язку з тим, що для гідрометеорологічного фактора зливогого змиву характерна підвищена варіабельність (коефіцієнт варіації змінюється від 1.21 до 3.06), помилка визначення середньобогаторічного за цими рядами розрахована за відомою формулою  $\delta_{\text{ср}} = C_v / \sqrt{n}$ , де:  $\delta_{\text{ср}}$  - помилка визначення середнього,  $C_v$  - коефіцієнт варіації,  $n$  - довжина ряду, складає 30-60 %. Якщо виходити із точності визначення норми  $K_{\text{ГМ}}$  15 %, то необхідна довжина ряду буде в залежності від величини коефіцієнта варіації складати 100-400 років. В умовах відсутності таких довгих рядів спостережень за потрібними для розрахунку метеорологічними елементами рішення задачі визначення норми  $K_{\text{ГМ}}$ , а отже і змиву ґрунту можливе на основі просторово-часових узагальнень рядів річних значень  $K_{\text{ГМ}}$ .

Якщо розглядати існуючі ряди річних значень гідрометеорологічного фактора як реалізацію стаціонарного випадкового процесу, то для однорідних фізико-географічних умов на основі гіпотези ергодичності можливе об'єднання рядів в один просторово-часовий ряд достатньої довжини. Отримане з цього ряду значення норми  $K_{\text{ГМ}}$  буде характеризувати гідрометеорологічні умови зливогого ерозії в межах даної однорідної території. Здається, цей підхід є єдино можливим для отримання норми гідрометеорологічного фактору зливогого змиву в сучасних умовах.

При районуванні Північно-Західного Причорномор'я за однорідністю гідрометеорологічних умов ерозійної діяльності, обумовленої зливогого діяльністю, застосоване сполучення статистичного та фізико-географічного аналізу. За основу було взято дослідження і районування просторової однорідності умов формування опадів в теплу пору року на території степової зони України, виконані Л.Д.Науменко (Науменко, 1988) з використанням параметричного критерія Вількоксона. Межа між виділеними на цій основі областями уточнена з обліком орографії місцевості і розташування зональних підтипів чорноземів. Для кожної області виконане об'єднання рядів  $K_{\text{ГМ}}$  в єдині просторово-часові сукупності довжиною від 93 до 198 членів, які і використані для розрахунку норми гідрометеорологічного фактору зливогого змиву

(табл.2). Представлені в таблиці 2 значення норми  $K_{TM}$  рекомендуються для практичного використання при розрахунках середньобогаторічної норми змивугрунту за допомогою модифікованого варіанту логіко-математичної моделі зливогого змиву (8)-(9).

Таблиця 2

Значення норми гідрометеорологічного фактора зливогого змиву для території Північно-західного Причорномор'я.

Область	Кількість членів ряду	Коефіцієнт варіації	Норма $K_{TM}$
Узбережжя Чорного моря і Подунав'є	93	2.26	0.0024
Центральні та північні райони Причорноморської низовини	198	2.24	0.0033
Відроги Молдавської, Подільської та Придніпровської височин	132	3.04	0.0051

Наявність адекватної математичної моделі скилового ерозійного процесу в принципі вирішує задачу оцінки та картографування ерозійної небезпечності території, яка до недавнього часу була дискусійною. І, хоча до нинішнього часу для оцінки ерозійної небезпеки продовжують застосовуватися варіанти бальної оцінки, вони, безумовно, поступаються перед методами оцінки, які ґрунтуються на використанні математичних моделей ерозійного процесу, оскільки саме математична модель становить собою формалізований опис взаємодії основних факторів, який опирається на теоретичний аналіз і прийшов апробацію.

Методика великомасштабного картографування ерозійної небезпеки земель-території господарства, зрошувальної системи або їх частин на основі математичної моделі ерозійного процесу в нинішній час добре відпрацьована: дослідницька територія покривається сіткою розрахункових профілів, проведених за лініями струмків від вододілів до найближчих елементів гідрографічної сітки, по яких з постійним або змінним шагом проводиться розрахунок модулів змиву ґрунту. За отриманими просторово прив'язаними значеннями модулів змиву будується карта ізоліній змиву, а

потім, після порівняння змиву з модулем, так званого, допустимого змиву, — карта ерозійної небезпеки території, яка дозволяє спланувати заходи щодо запобігання реалізації цієї небезпеки і створення ерозійностійкого агроландшафту.

Існуючі ж методики середньомасштабної оцінки ерозійної небезпеки території викликають серйозні заперечення, по перше, в зв'язку з існуючим підходом до вибору операційної територіальної одиниці, а по друге — з методиком врахування просторових змін факторів ерозійного процесу в межах цих одиниць.

Запропоновано методику середньомасштабної оцінки та картографування ерозійної небезпеки, в якій в якості операційної територіальної одиниці передбачається ландшафтний район, в межах якого вибирається репрезентативна ділянка. Узагальнені характеристики ерозійної небезпеки для кожного ландшафтного району одержуються на основі отриманих з використанням модифікованої логіко-математичної моделі ерозійного процесу для системи профілів, які будуться в межах репрезентативної ділянки з використанням метода систематичної випадкової виборки, розрахункових характеристик змиву і акумуляції ґрунту при заданих умовах використання земель. Для кожного профілю розрахунки виконуються з постійним шагом 100 м. Ці дані являються основою для отримання розподілення земель за градаціями інтенсивності змиву та середньої інтенсивності втрат ґрунту для ландшафтного району, а потім і іншої крупнішої природної або адміністративної територіальної одиниці.

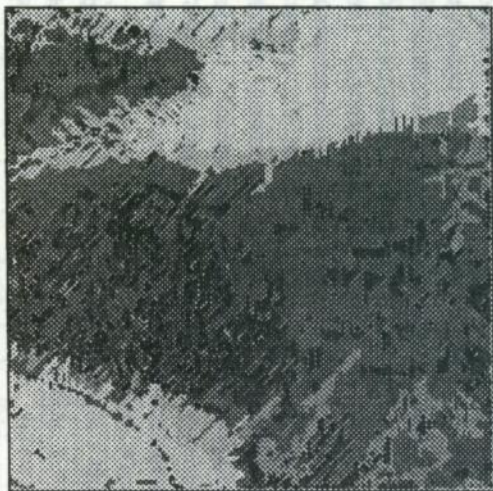
Дана методика була застосована при оцінці потенційної ерозійної небезпеки орних земель по адміністративних районах Одеської області (табл.3). В межах кожного адміністративного району було обрано в залежності від ландшафтної структури (Пилипенко, 1993) від одної до трьох репрезентативних ділянок розміром 20 км x 10 км .

Таблиця 3

Розподіл орних земель Одеської області (в відсотках від загальної площі ріллі) за градаціями інтенсивності змиву.

Градації розрахункового змиву, т/га/рік					Середній змив, т/га/рік
<2	2-5	5-10	10-20	>20	
34.5	21.6	16.3	15.1	12.9	8.4

Якісно новий рівень оцінки та картографування ерозійної небезпеки земель, причому як велико-, так і середньомаштабної, забезпечує технологія Географічних інформаційних систем (ГІС-технологія)—комп'ютерна технологія вводу, зберігання, обробки і представлення просторово-розподілених даних (Burrough, 1986; Тікунов, 1991; Podding et al., 1993; De Roo et al., 1994 та ін.). ГІС-технологія, що дає можливість дати детальний опис побудови поверхні оцінюваної території, особливостей ґрунтового покриву і використання земель, створює реальні умови для адекватного відображення просторової варіації факторів ерозійних та других процесів, пов'язаних з роботою води, так як всі вони мають яскраво виражений просторово розподілений характер. Крім просторового представлення вхідних даних в вигляді електронних растрових карт, яке забезпечує також рішення завдання автоматизації підготовки та вводу вхідних даних з практично необмеженим ступенем просторового розрешення, ГІС-технологія дає можливість просторово-розподільного виводу результатів у вигляді високоякісних карт, а також розрахунку просторового розподілення заданої або отриманої у вигляді карти характеристики та її середнього значення для любого замкненого контура (межі землекористування, сівозмінної ділянки, окремого поля, тощо) з врахуванням всієї сукупності значень характеристики в межах цього контура. Таким чином, технологія Географічних інформаційних систем являється в нинішній час найбільш адекватною технологією досліджень і оцінки просторових закономірностей ерозійних і других природних процесів. Основна проблема заключається в інтеграції програмних ГІС-пакетів та моделі ерозійного процесу або, що найкраще, розробки просторово-розподіленої моделі ерозійного процесу з використанням можливостей, представлених ГІС-технологією. Для цієї мети був використаний ГІС-пакет PC-Raster, розроблений в Університеті міста Утрехта, Нідерланди (Van Deursen, Wesseling, 1992). Основу просторової реалізації складає растрова цифрова модель рельєфу, створена засобами ГІС на основі дигітизування горизонталей великомаштабної топографічної карти і карт ліній струмків і "кількості вищележачих елементів". Остання являє собою карту площ водозборів для кожної чарунки растру. В склад вхідних даних входять також ґрунтова карта, карти використання земель та протиерозійних заходів єдиного масштабу. Результатом розрахунку являються карти потен-



а



б

Мал. 2. Комп'ютерні карти норми змиву ґрунту для полігонів розміром 900м x 900м у Болградському районі (а) і 9.5 км x 9.25 км у Березовському районі (б) Одеської області.

ціального або розрахункового для даних умов землевикористання змиву ґрунту, табличні дані, які характеризують розподіл земель за заданими градаціями інтенсивності змиву і середні для всієї території або деякої її частини модулі змиву.

Мал. 2 демонструє результати оцінки і картографування ерозійної небезпеки для двох полігонів різного розміру. На мал.2а представлені результати розрахунків змиву ґрунту за заданим землевикористанням для полігона 900 м x 900 м біля с.Баннівка Болградського району Одеської області (розмір растру 180 x 180 елементів, розмір елемента-5 м x 5 м). На мал. 2б -потенційного змиву ґрунту для полігону розміром 9.50 км x 9.25 км в Березовському районі Одеської області (розмір растру 380 x 370 елементів, розмір елемента-25 м x 25 м).

Оцінка ерозійної небезпеки земель існуючого та перспективного зрошення. Масовий розвиток зрошеного землеробства в регіоні і пов'язаний з цим вихід зрошених площ на схили, неминуче поставило проблему захисту ґрунтів зрошених земель від ерозії, при цьому не тільки від ерозії в процесі зрошення, як це завжди розглядається (Кузьманенко, 1973; Кузнецов, та ін. 1990; Гавриліца, 1993 та ін.), а також в результаті випадіння зливових опадів. І поливна і сіткова різновидності іригаційної ерозії пов'язані або з переполивом, або з витокками та із збросами із підвідної зрошувальної сітки. Інакше кажучи-нерациональної господарської діяльності. Завдання визначення ерозійнодопустимих зрошувальних норм в залежності від інтенсивності штучного дощу і його енергетичної структури, характеристик ґрунтів, рослинного покриву і уклону в нинішній час можна вважати вирішеним в теоретичному, а для ряду регіонів і в практичному плані (Єрхов, Кантор, 1975; Єрхов, 1981, Абрамов та ін. 1986, 1987; Кузнецов, 1990; Гавриліца, 1993 та ін.).

Однак порівняння інтенсивності та енергетичних характеристик штучного дощу сучасних дощувальних машин і природних злив показує, що система протиерозійних заходів на зрошуваних землях, також як і на богарі, повинна бути розрахована перед усім на захист ґрунтів від зливової ерозії, як найбільш небезпечної складової ерозійного процесу на зрошуваних землях. В зв'язку з цим постає питання про методику оцінки ерозійної небезпеки земель існуючого та перспективного зрошення, обумовленої змінами в факторах схилового ерозійного процесу під впливом зрошення.

Серед них очевидні зміни водного режиму ґрунтів та пов'язані з ними зміни вологості верхнього шару ґрунту, а також не дуже очевидні зміни фізичних, фізико-хімічних і мікробіологічних властивостей ґрунтів, які, тим не менш, можуть істотно впливати на інтенсивність ерозійних процесів. З основних факторів ерозійної небезпеки-рельєфного, ґрунтового і гідрометеорологічного-незмінним можливо враховувати тільки рельєфний, хоча, строго кажучи, цесправедливо тільки для зрошувальних систем із закритою зрошувальною та збросовою сіткою. Відкриті ж канали ділять схили на частини, змінюючи таким чином умови концентрації стоку. Однак, такого роду зміни без великих зусиль враховуються шляхом використання при розрахунках відповідних значень довжини схилу.

Для оцінки впливу рівня ґрунтової вологості на величину норми змиву ґрунту використований гідрометеорологічний фактор зливогого змиву, в явному вигляді враховуючий вплив вологості ґрунту. В зрошуваному землеробстві вологість активного шару ґрунту повинна підтримуватися в достатньо вузькому діапазоні значень-від найменшої вологості до критичної вологості, при якій редукція транспірації супроводжується пониженням продуктивності рослин. В зв'язку з цим порівняння середньобогатірічних значень гідрометеорологічного фактора зливогого змиву, розрахованих для умов природного зволоження ґрунтів і при ґрунтовій вологості, характерній для умов зрошення, дозволяє одержати кількісну оцінку впливу змін цього фактора під впливом зрошення.

Такого роду розрахунки виконані з використанням даних спостережень на метеостанції Болград, яка репрезентує кліматичні умови Центрального степу з південними чорноземами та метеостанції Вознесенськ, яка характеризує умови Північного степу із звичайними чорноземами, в яких зосереджені в нинішній час великі масиви зрошених земель, а також землі перспективного зрошення. Встановлено, що підвищений фон вологості зрошених земель збільшує середньобогатірічне значення гідрометеорологічного фактора зливогого змиву не більш ніж на 10% порівняно з незрошеними умовами.

Важливим фактором наносотворення являється протиерозійна стійкість ґрунтів, яка визначається фізичними, хімічними та біологічними властивостями ґрунту. Тому змінення цих властивостей, які неминуче відбуваються в результаті систематичного зро-

нення ґрунтів, що сформувалися в умовах недостатнього або нестійкого зволоження, повинно також змінити здатність ґрунтів зрошених земель протистояти ерозії.

В якості показника протиерозійної стійкості ґрунтів в роботі використана відносна змиваемість ґрунту ( $j$ ), яка є параметром логіко-математичної моделі зливогого змиву ґрунту Г.І. Швебса (Швебс, 1974), причому  $j = j_k j_p$ , де  $j_k$  - часткова характеристика відносної змиваемості, яка враховує водопроникність ґрунту, а  $j_p$  - часткова характеристика відносної змиваемості, яка враховує здібність ґрунту протистояти еродуючому впливу краплин дощу та потоку, який формується на поверхні схилу. Найбільш істотне змінення водопроникності ґрунтів під впливом зрошення пов'язано з ущільненням їх верхнього шару (Позняк, 1985; Баєр, 1987; Полупан, 1988; Ніколаєва та ін., 1989; Біланчін, Гоголев, 1993 та ін.). Оцінка впливу ущільнення ґрунту на часткову характеристику відносної змиваемості  $j_k$  виконана на основі узагальнення досліджень водопроникності ґрунтів Х.П.Богданова, Н.Е.Брхова та О.В.Кантора, І.І.Судніцина, Г.В.Назарова, Е.В.Полуктова, А.І.Болокана та К.Ю.Хана. Отримано, що для чорноземних та темнокаштанових ґрунтів важкого гранулометричного складу найбільш імовірно збільшення відносної змиваемості під впливом ущільнення ґрунту внаслідок зрошення оцінюється величиною 10-30%.

Оцінка змінення часткової характеристики відносної змиваемості  $j_p$  виконана за методом штучного дощування на діючих зрошувальних системах Одеської, Миколаївської, Кіровоградської, Херсонської, колишньої Кримської областей України та Ростовської області Російської Федерації на протязі 1982-1987 рр. В межах кожної ділянки вивчалася протиерозійна стійкість зрошених ґрунтів та одночасно - їх незрошених аналогів (контроль). Площадки в межах зрошуваної та незрошуваної частин ділянки закладалися таким чином, щоб їх ґрунтові, геоморфологічні та агротехнічні характеристики були ідентичними, тобто був видержаний принцип єдиній відмінності. Штучне дощування проводилося за допомогою струмково-краплинної дощувальної установки з площею зрошення  $1 \text{ м}^2$ . Умови проведення досліджень стандартні: рівний прямий схил, уклон 5%, площадка скопана, поверхність вирівняна (Методичні вказівки..., 1980). В результаті виконаних досліджень встановлено, що часткова характеристика  $j_p$  в умовах зро-

шення суттєво-в 1.5-5.0 разів-менша, ніж в незрошених. Іншими словами, здібність ґрунтів зрошених земель протистояти руйнівчому впливу дощу і потоку в 1.5-5.0 разище, ніж незрошених. Цей висновок також підтверджується експериментальними даними зарубіжних вчених (Kempen et, al, 1985; Govers, 1987; Bryan et al., 1988; Кузнецов та ін. 1990).

Виконані експериментальні та теоретичні дослідження дозволили зробити висновок, що при раціональному зрошенні не відбувається збільшення ерозійної небезпеки земель, а навіть навпаки-вона зменшується, дякуючи збільшенню протиерозійної стійкості ґрунтів зрошених земель. При оцінці ерозійної небезпеки земель існуючого і перспективного зрошення рекомендується використовувати наступні співвідношення:

$$K_{TM}^0 = 1.1 K_{TM}$$

$$J^0 = \phi (k_0) 0.45 J_p \quad (18)$$

$$\phi (k_0) = \frac{2.50 - 0.5 k_0}{2.50 - k_0}$$

де:  $k_0$ -встановлена інтенсивність вбирання води в ґрунт. Верхнім індексом "0" в (18) відмічені змінні, що відносяться до умов зрошення.

**Принципи імітаційного моделювання ерозійно-аккумулятивного процесу як методу дослідження і оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель.**

Імітаційне моделювання являється одним із найбільш ефективних методів дослідження і оптимізації управління складними природними та природно-господарськими системами (Шеннон, 1978; Ворочич та ін. 1988; Горстко та ін., 1984; Бісвас, 1985; Аасмяе, 1989; Полуєтков, 1991 та ін.). За означенням Р.Шеннона імітаційне моделювання є процес конструювання моделі реальної системи і постановці експериментів на цій моделі з метою або зрозуміти поведінку системи, або оцінити різноманітні стратегії, які забезпечують функціонування даної системи. Змістом імітаційного моделювання, як й кожного іншого виду моделювання, являється заміна реальної системи її моделлю. Однак, принциповою відмінністю імітаційного моделювання являється її початкова

орієнтація на використання можливостей ЕОМ. Сучасним втіленням ідеї імітаційного моделювання слідує рахувати імітаційну систему (імітаційну модель)—людино-машинну систему, яка забезпечує проведення імітаційних експериментів в режимі діалога між особою, яка проводить експеримент і "машиною", або комплексом програм, які включають програмно реалізовану математичну модель системи-оригіналу та програми управління.

Імітаційні моделі можуть бути використані як в імітаційному, так і в оптимізаційному режимах. В останньому випадку повинна бути чітко сформульована цільова функція. Однак стосовно до задач використання природних ресурсів в більшості випадків дуже складно сформулювати цільову функцію, що однозначно визначає вибір значень ендогенних змінних, по-перше, в зв'язку з недостатньою формалізацією вибору оптимального рішення та існуванням декількох критеріїв, які конкурують, а, по-друге, складністю математичних моделей і наявністю великої кількості управляючих змінних, оптимізація яких формальними методами неможлива. Внаслідок цього практично єдиним режимом дослідження та оптимізації агроландшафтних систем являється імітаційний, при якому дуже важливе значення мають правильно сформульовані сценарії експериментів з моделлю, які враховують мету і задачі дослідження, структуру і можливості імітаційної системи, в значній мірі визначені моделлю системи-оригіналу, що лежить в основі імітаційної системи.

Можливості метода імітаційного моделювання по аналізу та кількісній оцінці факторів ерозійної небезпеки агроландшафтів досліджено з допомогою комп'ютерних реалізацій модифікованого варіанту логіко-математичної та розробленої теоретичної моделей ерозійно-аккумулятивного процесу, при створенні яких були видержані основні принципи імітаційного моделювання: в основі їх лежать верифіковані моделі ерозійного процесу, результати розрахунків представляються в наглядній табличній та графічній формі, яка дозволяє легко їх аналізувати, передбачена можливість змінення значень внутрішніх та зовнішніх змінних в інтерактивному режимі, а також з використанням інформації, яка міститься в довідково-інформаційних блоках. В зв'язку з цим можна розмовляти про емпіричну та теоретичну імітаційні моделі ерозійно-аккумулятивного процесу, створені на базі розроблених емпіричної та теоретичної моделей ерозійного процесу.

Дякуючи детальності, теоретична імітаційна модель ерозійного процесу дає можливість виконувати оцінку впливу на характер та інтенсивність ерозійного процесу, а отже й на стійкість ерозійної системи агроландшафту, таких факторів як шар та інтенсивність атмосферних опадів, рівень попередньої дощу ґрунтової вологості, водопроникність ґрунту та шорсткість поверхні, а також протиерозійної ефективності агротехнічних заходів, оскільки остання визначається зміненням водопроникності ґрунту, шорсткості поверхні, захисної здібності рослинного покриву та затримуючої місткості мікрорельєфу поверхні, які в явному вигляді описуються моделлю. В якості об'єкту оцінки застосована улоговина Плоска (БПГЕВ), яка являє собою типовий схиллий водозбір із випуклою макроформою повздовжнього профілю з середнім ухилом 0.024 при діапазоні значень 0.017-0.035. Аналіз результатів імітаційних експериментів дозволив одержати кількісні залежності інтенсивності стоку води і змиву ґрунту—основних показників стійкості ерозійної системи агроландшафту—від показників їх кліматичних, ґрунтових і агротехнічних умов. На основі цих залежностей зроблено висновки щодо якості теоретичної імітаційної системи як інструменту досліджень і проектування, стійкості ерозійної системи агроландшафту, протиерозійної ефективності основних агрофонів і особливостей застосування деяких агротехнічних ґрунтозахисних заходів. Зокрема, встановлено, що найбільш ефективними в досліджуваному регіоні є протиерозійні заходи, спрямовані на збільшення шорсткості поверхні та її захисту від руйнівного впливу краплин дощу, а чергування смуг пару або просапних культур і богаторічних трав є інструментом управління схиллим ерозійно-акумулятивним процесом і створення ерозійно стійкої поверхні схилу.

Емпірична імітаційна модель дала можливість виконати оцінку впливу на характер та інтенсивність ерозійного процесу хвилястості повздовжнього профілю схилу. При цьому використані матеріали детального нівелювання повздовжніх профілей схилів в Іванівському, Овідіопольському та Болградському районах Одеської області. Для кожного схилу виконані розрахунки при значеннях розрахункового шагу, який змінюється від половини середнього шагу нівелювання на даному схилі—10-15 м до 150-200 м. В результаті встановлено, що розрахунок як середньої інтенсивності змиву ґрунту на схилі, так і зміни інтенсивності по його довжи-

ні істотно залежать від вибору шагу розрахунку ( $\Delta L$ ). При цьому середній розрахунковий модуль змиву із збільшенням  $\Delta L$  має складну динаміку. При збільшенні шагу розрахунку від рівного шагу зйомки до його  $2^X-3^X$  кратного значення завжди відмічається зменшення середнього модуля змиву, часто в 1.5-2 рази. При подальшому збільшенні  $\Delta L$  середній модуль змиву має тенденцію до збільшення. Середньоквадратичне відхилення розрахункових значень змиву від середнього, як правило, зменшується з ростом  $\Delta L$ .

Метод імітаційного моделювання відкриває широкі можливості в рішенні задачі оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель. Основою оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель, як відомо, складає оптимізація ґрунтової системи агроландшафту, яка може бути виконана на основі моделі раціонального використання ґрунтових ресурсів ерозійнонебезпечних територій, яка розроблена Г.І.Швебсом (1974, 1981). В якості критерія оптимізації в ній прийняті доцільно допустимі зміни показника ґрунтових ресурсів-добутку потужності родючого шару ґрунту ( $N_T$ ) і середнього вмісту гумусу ( $\Gamma$ ). В залежності від співвідношення початкових ресурсів в заданій точці схилу необхідне виконання різних сценаріїв застосування ґрунтових ресурсів: регульовані витрати (1), просте (2) і розширене (3) їх відтворення (Швебс, 1981; Каштанов та ін., 1994). Оптимізація використання ґрунтових ресурсів схилних земель полягає в виборі варіанту використання земель, який забезпечує виконання в кожній точці території умов:

$$W \leq \Delta N_{T(\text{доп})} - D \quad (19)$$

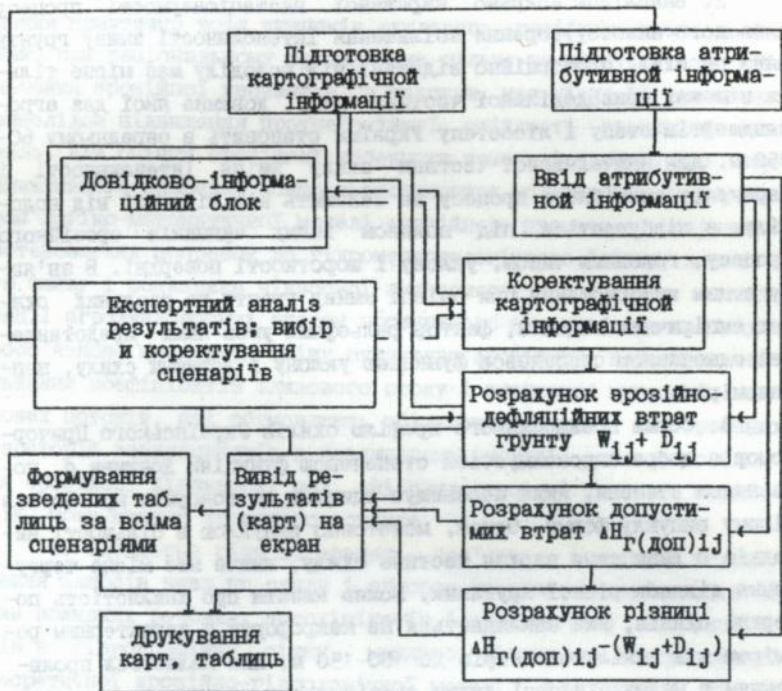
де:  $W$  - модуль ерозійних втрат ґрунту, т/га;  $D$  - модуль дефляційних втрат ґрунту, т/га.  $\Delta N_{T(\text{доп})}$  - модуль допустимих втрат ґрунту, т/га.

І ліва і права частини цієї нерівності являються істотно нелінійними функціями своїх аргументів, які характеризуються ще й наявністю прямих і зворотніх зв'язків між ними. В зв'язку з цим застосування тут методів математичного програмування або формальних процедур оптимізації надто важке (Горстко та ін., 1984; Мишкіс, 1994). Рішення задачі можливе методом імітаційного моделювання з застосуванням алгоритмів оцінки допустимих втрат ґрунту та адекватних моделей ерозійного і дефляційного процесів, які дозволяють виконати оцінку змиву ґрунту та дефляції для заданої точки досліджуваної території при різних сцена-

ріях використання земельних ресурсів. Цей підхід реалізован в комп'ютерній системі агроландшафтного проектування (Svetlitchniy et al., 1992; Швебс та ін., 1993), в якій в якості моделі ерозійного процесу застосовується модифікований варіант логіко-математичної моделі змиву ґрунту. Методика оптимізації полягає в багатоваріантних імітаційних експериментах з використанням моделей ерозійного процесу, дефляції, допустимих втрат ґрунту, методик розрахунку гідротехнічних протиерозійних споруд та лісосмуг, а також доз мінеральних добрив, які проводяться для окремих поздовжніх профілів, побудованих в межах дослідницької території. Після кожного циклу експериментів виконується аналіз результатів та коректування сценаріїв землекористування на основі нерівності (19) та системи технологічних і економічних показників.

Однак, технологія підготовки та вводу даних, а також представлення результатів розрахунків обмежують застосування даної методики на відносно великій території, так як із збільшенням числа розрахункових профілів обсяг вхідної та вихідної інформації дуже швидко збільшується до практично нереальних розмірів. Крім цього, застосування профільного підходу не дозволяє враховувати поперечну концентрацію скилового стікання. Перебороти відмічені обмеження та недоліки традиційного підходу дає можливість технологія Географічних інформаційних систем, яка дозволяє перейти від системи розрахункових профілів до просторового моделювання та оптимізації з врахуванням унікальних властивостей побудови поверхні дослідницької території та просторового розподілення всіх природних та господарських факторів.

Проведені дослідження показали можливість практичної реалізації просторово розподіленої системи оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель на основі критерія (19) засобами ГІС технології. Схема функціонування такої системи представлена на Мал. 3.



Мал.3. Схема функціонування просторово розподіленої системи оптимізації агроландшафту, реалізованої засобами ГІС технології.

### ГОЛОВНІ ВИСНОВКИ

1. З точки зору рішення завдань щодо оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель, безумовно найкращими являються детальні фізично обґрунтовані теоретичні моделі ерозійно-аккумулятивного процесу. Однак, вельми серйозною перешкодою до їх широкого розповсюдження у практиці являються підвищені вимоги до інформаційного забезпечення. Тому емпіричні моделі, особливо, фізико-статистичні, до яких відносяться Універсальне рівняння втрат ґрунту США, логіко-математична модель Г.І.Швебса, формули Г.П.Сурмача, І.К.Срібного та інші, не загубили і в доступному огляду майбутньому не загублять свого практичного значення. Завдання полягає в подальшому удосконаленні як емпіричних, так і теоретичних моделей ерозійного процесу, оскільки і ті і інші містять ряд суттєвих недоліків.

2. Внаслідок яскраво вираженої нестационарності процесу зливогого наносоутворення збільшення інтенсивності змиву ґрунту вниз по схилу пропорційно відстані від вододілу має місце тільки в межах привододільної частини схилу, довжина якої для агроландшафтів степу і лісостепу України становить в середньому 60-150 м. Для нижчележачої частини схилу зміна інтенсивності і характеру ерозійного процесу не залежить від відстані від вододілу, а відбувається під впливом інших чинників ерозійного процесу, головним чином, уклону і шорсткості поверхні. В зв'язку з цим використання при оцінці змиву ґрунту на реальних схилах емпіричних моделей, фактор рельєфних умов яких представлений одночленовою степеневою функцією уклону і довжини схилу, неправомірно.

3. Форма повздожнього профілю схилів Українського Причорномор'я добре апроксимується степеневою функцією довжини з показником степеня, який перевищує одиницю, що говорить про його в цілому випуклу форму. Однак, монотонно випуклою в більшості випадків є лише сама верхня частина схилу, нижче має місце чергування ділянок різної крутизни. Можна казати про хвилястість поверхні схилів, яка накладається на макроформу з характерним розміром від декількох метрів до 100-150 м, яка являється проявленням в межах схилової ланки ерозійно-акумулятивного процесу принципу взаємодії потоку і русла, сформульованого М.А.Великановим і яка, в свою чергу, впливає на інтенсивність і характер схилового ерозійного процесу. При детальних (великомасштабних) дослідженнях і протиерозійному проектуванні розрахунки змиву в зв'язку з цим повинні виконуватися з кроком не більше 20 м.

4. Впровадження поняття "зона активного наносоутворення" як частини схилу, в межах якої відбувається наростання інтенсивності змиву ґрунту, і обґрунтування багаточленної залежності інтенсивності ерозійного процесу від визначаючих факторів з перемінним значенням показника степеня при довжині схилу забезпечують в рамках емпіричного підходу можливість урахування основних особливостей змінення інтенсивності ерозійно-акумулятивного процесу вздовж схилу довільної форми. Модифікований на цих принципах варіант логіко-математичної моделі зливогого змиву дозволяє виконати оцінку інтенсивності змиву ґрунту і/або акумуляції наносів в заданій точці схилу довільної довжини і форми.

5. Під впливом систематичного зрошення відбувається змі-

нення практично всіх чинників скилового ерозійного процесу. Однак, при раціональному зрошенні не тільки не відбувається збільшення ерозійної небезпеки, а навпаки, має місце її зменшення внаслідок підвищення протиерозійної стійкості зрошуваних земель. Для оцінки ерозійної небезпеки земель існуючого або перспективного зрошення можна користуватися модифікованим варіантом логіко-математичної моделі ерозійного процесу з урахуванням встановлених поправок до гідрометеорологічного фактору зливового змиву і показника відносної змиваємості ґрунту. При оптимізації агроландшафтних систем зрошуваного землеробства необхідно обов'язково врахувати зміну структури ерозійної небезпеки-збільшення коефіцієнтів зливового стоку і зменшення мутності скилових потоків, які обумовлюють збільшення виносу зі зрошених територій забруднювачів в розчиненому вигляді, а також посилення ерозійної діяльності вод, які скидаються зі зрошених територій, поза межами зрошеного контура.

6. Адекватне рішення завдань, пов'язаних з оцінкою переміщення наносів вниз по схилу і виносом твердого матеріалу, а з ним поживних речовин, агрохімікатів і різного роду забруднювачів в гідрографічну сітку, можливо тільки з використанням теоретичної ерозійно-гідрологічної моделі, яка описує процес формування твердого стоку. В умовах степу і лісостепу України для цієї мети рекомендується детальна теоретична модель ерозійно-аккумулятивного процесу, яка опирається на досягнутий рівень досліджень процесу і сучасний стан інформаційного забезпечення.

7. Основним методом досліджень і оцінки факторів ерозійної небезпеки, а також оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель з використанням математичної моделі раціонального використання ресурсів ґрунтової родючості і системи забезпечуючих моделей, які являють собою нелінійні функції своїх аргументів з наявністю прямих і зворотних зв'язків, є метод імітаційного моделювання, який базується на застосуванні сучасної обчислювальної техніки. Для оптимізації використання ерозійної системи агроландшафтів степу і лісостепу України для цієї мети можуть бути використані комп'ютерні реалізації модифікованого варіанту логіко-математичної моделі змиву ґрунту і розробленої теоретичної моделі ерозійно-аккумулятивного процесу.

8. Врахування просторової структури ерозійно-аккумулятивно-

го процесу як при оцінці і картографуванні ерозійної небезпеки, так і оптимізації використання ерозійнонебезпечних земель може бути виконано з використанням технології Географічних інформаційних систем (ГІС). В нинішній час засобами ГІС можуть бути реалізовані всі основні етапи агроландшафтного проектування, в тому числі підготовка і модифікація даних, реалізація обчислювального алгоритму, створення високоякісних карт просторового розповсюдження як вхідних, так і розрахункових характеристик. Технологія Географічних інформаційних систем, таким чином, є інструментом, створюючим реальні передумови для якісно нового рівня моделювання скилового процесу і рішення на цій основі прикладних задач.

### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

#### Монографії

1. Лиманно-устьевые комплексы Причерноморья. Географические основы хозяйственного освоения. Под ред. Г.И.Швебе. Л.: Наука, 1988. 304 с. (співавтори Ю.О.Амброз, С.О.Антонова, Я.М.Біланчін та ін.)
2. Пространственно-временная оценка ливневой эрозии почв. Деп. ІНТБ України, N 1911-Ук95, 1995. 131 с.

#### Статті, доповіді

3. Использование модели формирования дождевого стока для оценки его антропогенных изменений//Теоретические основы противоэрозионных мероприятий, часть I. Одесса, 1979, с. 100-101 (співавтор І.А.Макеєва).
4. Оценка противоэрозионной эффективности почвозащитных мероприятий//Почвоведение, 1984, N 7, с. 114-121 (співавтор Г.І.Швебе).
5. Ирригационная эрозия почв и вопросы проектирования природно-хозяйственных оросительных систем//Физическая география и геоморфология, 1987, вып.34, с.118-123 (співавтор Г.І.Швебе).
6. Противоэрозионная стойкость почв юга УССР и ее изменение под влиянием орошения//Почвоведение, 1988, N 1, с.94-100 (співавтори Г.І.Швебе, С.Г.Чорний).
7. Расчет склоновых наносов и обвражной эрозии для обоснования противоэрозионных мероприятий//Труды V Всесоюзного гидрологического съезда, т.10, кн.2. Л.: Гидрометеоздат, 1988, с. 141-148 (співавтори Г.І.Швебе, М.І.Ігошин, В.В.Белов та ін.).

8. Определение эрозийной опасности орошаемых земель//Земледелие, 1989, N 7, с.74-75 (співавтор Г.І.Швебс).
9. Об использовании индексов предшествующего увлажнения в практике гидрологических расчетов и прогнозов//Метеорология, климатология и гидрология, 1989, вып. 24. с.45-52 (співавтор І.А.Світлична).
10. Вопросы пространственной структуризации при моделировании гидрологического режима орошаемой территории//Труды ГТИ, 1990, вып. 341. с. 11-19 (співавтори Г.І.Швебс, В.Ф.Тулльверт, С.С.Прокопенко, М.І.Чердинцева).
11. Ирригационная эрозия и вопросы проектирования противоэрозийных мероприятий в условиях Степи УССР//Почвозащитная технология полива и повышение надежности противопаводковой защиты. Пушино, 1990. с.11-15 (співавтор Г.І.Швебс).
12. Анализ учета рельефных условий склонового эрозийно-аккумулятивного процесса в математических моделях смыва почвы// Экологические аспекты использования и охраны почвенных ресурсов Молдавии, том II, Кишинев, 1990, с.65-66.
13. Зрощування та ерозійні процеси//Сучасні географічні проблеми Української РСР. Київ, 1990, с.140-141.
14. Имитационное моделирование рационального использования водных ресурсов мелиорируемых территорий//Труды V Всесоюзного гидрологического съезда, т. 4. Л.:Гидрометеоиздат, 1990, с. 519-526 (співавтори О.Б.Горстко, М.І.Чердинцева, Г.І.Швебс та ін.).
15. Системно-имитационная методология эрозиоведения//Эрозиоведение: теория, эксперимент, практика. Изд-во Моск. ун-та, 1991, с. 169-170 (співавтори Г.І.Швебс, М.І.Ігошин, Ф.М.Лісецький).
16. Модель перераспределения склоновых наносов по русловой сети речного бассейна//Метеорология, климатология и гидрология, 1991, вып. 26. с. 46-51.
17. Рельефные условия склонового водно-эрозийного процесса и вопросы их моделирования//География и природные ресурсы, 1991, N 4, с. 123-131.
18. Object-oriented approach in designing optimal agrolandscape based upon GIS // J.J.Harts, H.F.L.Ottens, H.J.Scholten (eds), EGIS'92 Conference Proceedings, vol.1. EGIS Foundation, Utrecht/Amsterdam, The Netherlands, 1992, p.423-430 (співавтори І.А.Єгоркін, Г.І.Швебс, Ф.М.Лісецький).

19. Компьютерная система оптимизации использования эрозивно- и дефляционноопасных земель Украинского Причерноморья // Оросительные мелиорации — их развитие, эффективность и проблемы. Херсон, 1993. с. 51–52 (співавтори Г.І.Швебс, С.О.Єршов, В.С.Кирток та ін.).

20. Гидрометеорологические условия формирования ливневой эрозии почв. Деп. ГНТБ Украины, N 261-Ук93, 1993. 11 с. (співавтори Г.І.Швебс, С.Г.Чорний)

21. Mathematical modelling of erosion-accumulative process on a slope // V.V.Medvedev (ed), Collection of articles by Ukrainian members of European Society For Soil Conservation, 1993, p.46–52.

22. Spatial process based soil erosion model and GIS // J.J. Harts, H.F.L.Ottens, H.J.Scholten (eds), EGIS/MARI'94 Conference Proceedings, Utrecht-Amsterdam: EGIS Foundation, 1994, p. 1996–1998 (співавтори І.А.Світлична, М.Б.Іванько).

23. Elaboration of decision support system for optimization of land resources, using GIS // J.J.Harts, H.F.L.Ottens, H.J.Scholten (eds), EGIS/MARI' 94 Conference Proceedings, Utrecht-Amsterdam: EGIS Foundation, 1994, p.1876–1883 (співавтори Г.І.Швебс, С.В.Плотницький).

24. System of mathematical models of slope stage of erosion-accumulative process // Proceedings of the international symposium "East-West, North-South Encounter on Stage-of-the Art in River Engineering methods and Design Philosophies". St. Petersburg, Russia, 1994, p.50–52 (співавтор Г.І.Швебс).

25. ГІС-технологія і гідроекологічне моделювання // VII з'їзд Українського географічного товариства. Тези доповідей. Київ, 1995. с.380–382 (співавтор А.П.Дж. Де Рюо).

26. Сучасні проблеми та перспективи математичного моделювання водної ерозії ґрунтів // VII з'їзд Українського географічного товариства. Тези доповідей. Київ, 1995, с. 388–390.

27. Пространственная структура склонового эрозийного процесса и проблемы ее учета при противозерозийном проектировании // Эрозия почв и методы борьбы с ней. Кишинев, 1995, с.26–27.

#### Авторські свідчення.

28. Способ возделывания сельскохозяйственных культур в севообороте на склоне. Авторское свидетельство N 1797761, 1992 (співавтори С.Г.Чорний, Г.І.Швебс).

**Светличный А.А.** Количественная оценка характеристик склонового эрозионного процесса и вопросы оптимизация использования эрозионноопасных земель.

Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 11.00.11—конструктивная география и рациональное использование природных ресурсов, Одесский государственный университет им. И.И.Мечникова, Одесса, 1995.

Обоснованы принципы учета пространственных закономерностей склонового эрозионного процесса, опирающиеся на концепцию эрозионно-аккумулятивного процесса как диалектического единства смыва и аккумуляции на склоне. Рассмотрены методические вопросы пространственно-временной оценки эрозионной опасности при противоэрозионном проектировании в условиях степи и лесостепи Украины, в том числе с использованием технологии Географических информационных систем. Обоснованы принципы исследований эрозионной системы агроландшафтов, а также оптимизации использования эрозионноопасных земель с применением метода имитационного моделирования.

**Svetlitchnyi A.A.** Quantitative assessment of characteristics of slope erosion process and problems of optimization of soil erosion hazard lands usage.

Dissertation for Doctor of Science degree in Geography, specific field 11.00.11—constructive geography and rational natural resources usage, Odessa Mechnicov University, Odessa, 1995.

Theoretical principles of accounting of spatial regularities of slope erosion process, based on the conception of erosion-sedimentation process as the unity of wash off and sedimentation on a slope are justified. Systematic questions of spatial-temporal assessment of soil erosion hazard for soil protective designing in conditions of Ukrainian Steppe and Forest-Steppe zones using GIS technology as well are examined. The principles of agrolandscape's erosion system investigation and optimization of soil erosion hazard lands uswage on the base of semulation modelling method are developed.

**Ключові слова:** ерозійно-аккумулятивний процес, математичне моделювання, ГІС технологія, обґрунтування раціонального землекористування.





Подписано к печати 18.09.95 г. Формат 60x84/16.  
Объем 6 п. л. Тираж 100 экз. Бумага писчая.

Отпечатано НПФ «Астропринт».  
Тел.: 68-77-33, 22-64-84.

444083





**AB 33.041**