

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЧВ  
НА МАРШРУТАХ ПРОКЛАДКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ  
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

**А.Т. ДЖАМАЛОВ, Р.М. РАГИМОВ**

Исследуется возможность прогнозирования эрозионных процессов в грунте на маршрутах прокладки магистральных трубопроводов (МТ), что позволяет выбрать наиболее оптимальный маршрут прокладки МТ с минимальным риском. Составлено Универсальное уравнение потерь почвы (УУПП), определены все переменные, входящие в УУПП. Получена растровая карта модели УУПП для выбранного тестового участка и таблица оценок интенсивности потерь почвы.

**ВСТУП**

В результате дешифрования результатов аэрокосмической съемки решаются разные задачи, важнейшими из которых, на наш взгляд, являются: выявление аварийно-опасных участков и неблагоприятных природных явлений вблизи магистральных трубопроводов (МТ), развитие эрозионных и склоновых процессов, воздействие подземных и поверхностных вод, а также различные смещения, определяемые действиями гравитационных и других сил.

В данной работе исследуется возможность оценки риска эрозионных процессов на участках прокладки МТ на основе геоинформационных технологий и космических снимков высокого разрешения.

Карты эрозионно-опасных земель являются основой при решении задач по защите инфраструктур, в частности, технических коридоров прокладки магистральных нефтегазопроводов и должны давать объективное представление о распространении и степени эрозионной опасности земель, а также отвечать ряду требований, зависящих от стадии проектно-изыскательских работ. Решение этой проблемы достигается количественной оценкой основных факторов эрозии и использованием математических зависимостей между процессами и факторами их определяющими.

Для оценки эрозионной опасности могут использоваться различные модели эрозии, для которых должна быть создана соответствующая справочно-информационная база, охватывающая исследуемую зону региона.

Картирование почвенной эрозии, при использовании ГИС, дает возможность идентифицировать зоны потенциального риска интенсивной почвенной эрозии и позволяет дать количественную оценку потери почв в различных участках технического коридора для прокладки МТ.

Геоинформационные технологии основываются на использовании пространственной информации, как основы для моделирования различных процессов и объектов в геотехнической системе, включая эрозионные процес-

сы. В последнее время были разработаны (в комбинации с ГИС программой) несколько моделей почвенной эрозии [1], одной из которых является Уточненное универсальное уравнение потерь почвы (УУПП).

В УУПП эродируемость определяется двумя группами факторов. К первой относятся основные характеристики почвы, такие как гранулометрический состав, содержание органического вещества, инфильтрационная способность и другие. Ко второй группе факторов относятся обработка почвы до посадки растений и в период ухода за ними, рельеф местности, характер проводимых противоэрозионных мероприятий и т.д. (рис. 1).

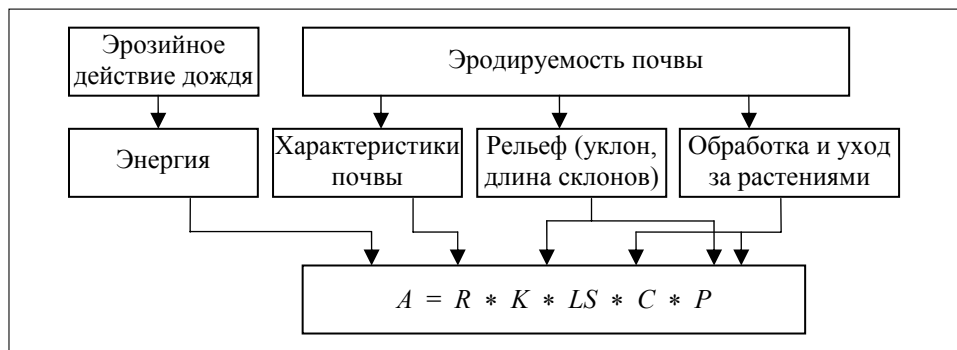


Рис. 1. Факторы, определяющие водную эрозию почв

Переменные, входящие в УУПП модель, описанную ниже, характеризуют почвенные данные для генерирования оценки риска эрозии.

На рис. 2–4 показаны примеры карт изучаемого региона (рис. 2 — векторизированная почвенная карта; рис. 3 — векторизированная климатическая карта; рис. 4 — цифровая модель рельефа).

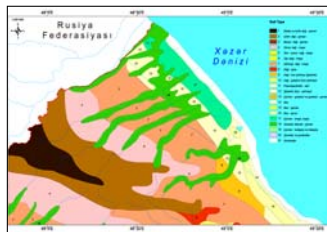


Рис. 2

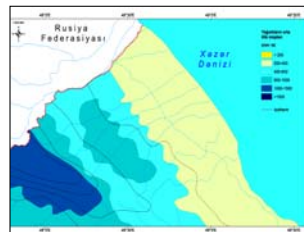


Рис. 3

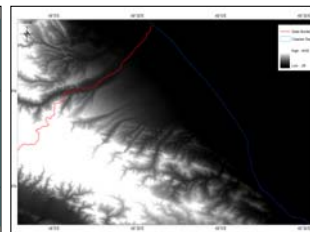


Рис. 4

## ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭРОЗИИ ПОЧВ. ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В основе методов расчета склоновой водной эрозии лежит следующая зависимость:

$$A = f(R, K, L, S, C, P), \quad (1)$$

где  $A$  — средние годовые потери почвы на единицу площади в год;  $R$ ,  $K$ ,  $L$  и  $S$  — индексы, учитывающие влияние энергии на величину смыва почв; интенсивности ливней ( $R$ ), типа и состояния почвы ( $K$ ), длины ( $L$ ) и величины крутизны склона ( $S$ );  $C$  — индекс, отражающий почвенно-растительный покров;  $P$  — индекс влияния противоэрозионных почвозащитных мероприятий.

Модель УУПП позволяет прогнозировать эродируемость почв и эффективна при определении пространственных изображений потерь почвы в исследуемом регионе. При этом ГИС позволяет выделить и определить роль каждой переменной выражения (1) при определении среднегодовой эрозии почв, которая определяется как

$$A = R * K * L * S * C * P, \quad (2)$$

где \* — функция умножения.

Переменные уравнения (2) могут быть разделены на две части [2]:

- $R$ ,  $L$ ,  $S$  и  $K$  факторы — переменные окружающей среды (переменные относительно стабильные по времени).
- $C$  и  $P$  факторы — переменные управления и их изменения носят сезонный характер (могут в течение года достаточно часто меняться).

УУПП модель имеет ряд ограничений, которые условно можно разделить на три категории:

- расположение исследуемого участка, в котором применяется УУПП;
- ограничения, связанные с математическими вычислениями;
- ограничения в масштабе.

Для проверки функционирования эмпирической модели и оценки процессов эрозии был выбран тестовый участок, расположенный в бассейне реки Куручай (Куба-Кусарский район) Азербайджана.

Бассейн реки Куручай имеет площадь приблизительно 19947 га (рис. 5) и, в свою очередь, состоит из нескольких водоразделов, которые имеют площадь от 282 до 12641 га. Выбранный в качестве тестового участок имеет площадь порядка 8975 га.

Обоснованием выбора данного тестового участка (ТУ) являются следующие причины: доступность пространственной и текстовой информации по почвам; различные виды почвенно-растительного покрова; топографические изменения по высоте и по наклону.

Данные модели почвы включают: почвенные данные; данные по рельефу; состояние почвенно-растительного покрова; данные о водных ресурсах и количестве атмосферных осадков; данные по почвенно-защитным мероприятиям; данные о границах водных бассейнов.

Для исследования тестового участка мы использовали космический снимок высокого разрешения со спутника Quick Bird (рис. 6). В результате дешифрирования космического снимка, дополненного полевыми исследованиями была составлена легенда тестового участка, включающая дороги, кустарники, огороды, водохранилища, русла рек, сельскохозяйственные угодья, леса, жилые массивы (рис. 7).

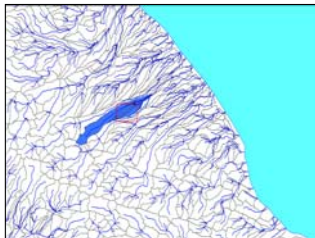


Рис. 5. Пример карты бассейна реки Куручай с тестовым участком

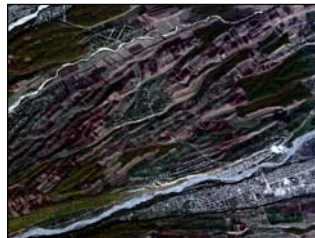


Рис. 6. Пример QuickBird снимка тестового участка

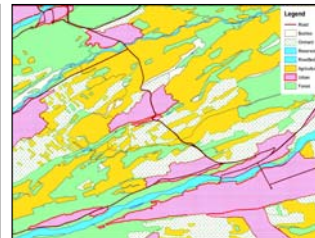


Рис. 7. Пример почвенно-растительного покрова тестового участка

Для исследования процесса эрозии почв на выбранном тестовом участке на маршруте прокладки магистрального газопровода необходимо составить эмпирическую модель расчета УУПП (уравнение 2) и определить значения входящих в нее переменных параметров.

Для генерации *K*-фактора (подверженность эрозии почвы) использовалась пространственная и справочная информация о составе почв данного ТУ.

Составленная цифровая модель рельефа (ЦМР) с разрешением в плане 75 м, дает информацию о высоте, что позволяет определить *L* и *S* факторы (длина и крутизна склона).

Цифровая информация о почвенно-растительном покрове, являющимся решающим фактором влияющим на эрозию почв, в соответствии с MLCCS (Minnesota Land Cover Classification System — система классификации растительного покрова штата Миннесота), использовалась для генерации *C* фактора. Данные о количестве атмосферных осадков использовались для генерации *R* фактора (дождевые и другие виды осадков). Информация об *P* факторе (почвенно-защитные мероприятия) для данного ТУ отсутствовала.

Для генерации модели УУПП была спроектирована ГИС УУПП с пространственным разрешением 75 м на основе программного обеспечения ESRI (Environmental Systems Research Institute — пакет программ, разработанный Институтом по исследованиям систем окружающей среды).

Для реализации проекта использовалась географическая проекция UTM, Zone 39N и все исходные данные были переведены в эту проекцию для дальнейшей обработки.

Следующим этапом была осуществлена процедура преобразования картографических слоев данных из векторного формата в растровый с помощью программы Spatial Analyst. Выходные растровые файлы были генерированы с пространственным разрешением 75 м (рис. 8 и 9).

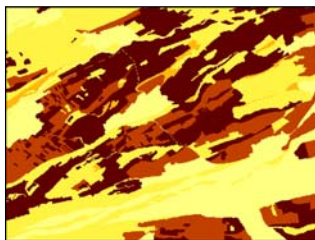


Рис. 8. Пример растра MLCCS, соответствующий значению *C*-фактора (почвенное покрытие)

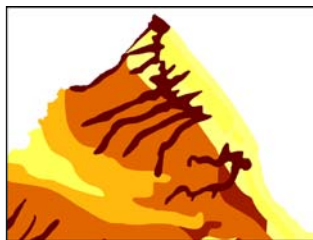


Рис. 9. Пример растра STATSGO, соответствующий значению *K*-фактора (эродируемость почвы)

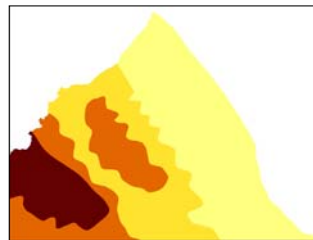


Рис. 10. Пример растра *R*-фактора, соответствующий значению атмосферных осадков

На рис. 10 показан растр *R*-фактора, соответствующий значению количества атмосферных осадков, на рис. 11 — растр *S*-фактора, соответствующий значению крутизны склона.

Были использованы специальные функции программы (ESRI) для создания выходного растра необходимого для определения направления водных течений исследуемого участка и для определения участков скопления воды. Растр сгенерирован размером пикселя в 75 м (рис. 12).

После выполнения описанных шагов, выходные данные о состоянии почвенно-растительного покрова, типе почвы, *R*-фактор, *P*-фактор, *L* и *S* факторы были включены в УУПП.

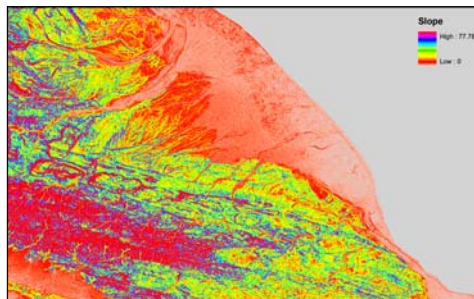


Рис. 11. Пример растра крутизны склона

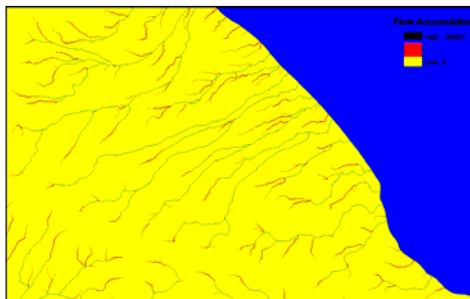


Рис. 12. Пример растра направления течений

Для преобразования векторных данных о почвенно-растительном покрове, типе почв, *R* и *P* факторах в каждый картографический слой добавлялись атрибутивные данные, которые содержат соответствующие значения фактора для каждого ТУ.

Значения *C*-фактора (эродируемость почв определенная в зависимости от типа покрытия) были выбраны из табл. 1 классификации MLCCS в соответствие с картой почвенно-растительного покрова выбранного тестового участка.

*C*-фактор имеет цифровое значение от нуля до единицы, и при значениях, близких к нулю, почва имеет низкий показатель эродируемости.

*K*-фактор, соответствующий типу и состоянию почвы, был выбран из табл. 2 согласно классификации STATGO (State Soil Geographic — Государственная географическая база данных по почвам).

**Таблица 1.** MLCCS классификация почвенно-растительного покрова и соответствующие им значения *C*-фактора

MLCCS	
Land Cover Type	C Factor
Cattail marsh permanently flooded	0,001
Coniferous forest	0,001
Cultivated herbaceous vegetation	0,320
Deciduous forest	0,002
Deciduous shrubland	0,025
Fruit trees on upland soils	0,110
Floodplain forest	0,010
Floodplain forest swamp while oak subtype	0,015
Grassland with sparse deciduous trees	0,010
Hydric soil row cropland	0,470
Lowland hardwood forest	0,001
Maple – basswood forest	0,002
Medium – tall grassland	0,012

Продолжение табл. 1

Medium – tall grassland altered/non-native dominated	0,015
Mixed coniferous-deciduous forest	0,001
Mixed coniferous-deciduous woodland	0,002
Oak forest with 4 % to 10 % impervious cover	0,004
Oak forest	0,002
Oak forest dry subtype	0,002
Oak woodland-brushland	0,005
Paulstrine open water	0,000
Planed or maintained grasses	0,140
Planed or maintained grasses with sparse tree cover	0,100
Planed, maintained or cultivated deciduous trees	0,070
Sand gravel pits with 0% to 10% impervious cover	0,000
Unconsolidated material (soil, sand and ash)	1,000
Upland coniferous forest	0,001
Upland coniferous woodland	0,001
Upland deciduous forest	0,002
Upland deciduous shrubland	0,005
Upland deciduous woodland	0,002

**Таблица 2.** Типы почв согласно USDA NRCS STATGO и соответствующие им значения *K*-фактора

STATGO Soil Data-set	Soil Type	MN240	MN216	MN221	MN225	MN212	MN216	MN228	MN214	MN240
	<i>K</i> Factor	0,3440	0,3240	0,3730	0,3340	0,3030	0,3240	0,1840	0,2950	0,3440

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УУПП

После того, как значения *C*, *K*, *R* и *P* факторов были добавлены в таблицы атрибутов и картографические слои MLCCS, STATSGO, факторы длины и крутизны склона и водных скоплений преобразованы из векторной формы в растровый формат, производится вычисление модели УУПП.

*L* и *S* факторы (длина и крутизна склона) были вычислены, используя ранее генерированные растры склона и водных скоплений. Очевидно, что чем длиннее и круче склон, тем большее значение имеет фактор аккумуляции поверхностного стока, что приводит к повышенной эрозии почв.

Для вычисления *LS*-фактора было использовано эмпирическое уравнение, опубликованное в USDA Agriculture Handbook № 537 [3] с соответствующими добавлениями [4].

Эмпирическое уравнение, использованное для вычисления *LS*-фактора в нашем проекте имеет вид:

$$LS = (\text{Flow Accumulation grid} * \text{cell size} / 22,13)^{0,4} * 0,01745 / 0,0896)^{1,4} * 1,4 .$$

На рис. 13 показана растровая карта длины и крутизны склона.



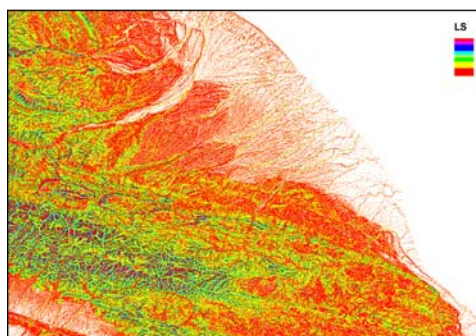


Рис. 13. Пример растра длины и крутизны склона

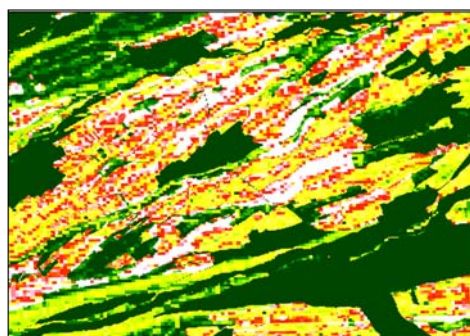


Рис. 14. Пример растра карты риска эрозии почвы вызванной водными накоплениями

## ВЫВОДЫ

1. Конечным результатом исследований является полученный растр модели УУШП для определения риска эрозии почв в водосборе реки Куручай. Результат был использован при проведении проектных работ по прокладке северного маршрута магистрального газопровода (рис. 14).

2. Получены оценки интенсивности потерь количества почвы на тестовом участке (табл. 3).

**Таблица 3.** Примерная оценка интенсивности потерь почвы на тестовом участке

Диапазон интенсивности смыва, тонн/га·год	Площадь, га	Среднее количество смываемой почвы, т
< 0,5	3547,69	886,92
0,5 – 1,0	445,63	334,22
1,0 – 5,0	1074,31	2685,78
5,0 – 10,0	716,31	5372,34
10,0 – 25,0	1269,75	22220,63
25,0 – 50,0	894,5	33543,75
50,0 – 75,0	365,19	22824,22
75,0 – 100,0	218,88	19151,56
> 100,0	442,88	44287,50

Для более детального анализа распространения эрозии требуется ЦММ с более высоким пространственным разрешением из-за соизмеримости длины склонов с пространственным разрешением исходной цифровой модели местности, которое составляет 75 м.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wilson J.P. GIS-based Land Surface/Subsurface Modeling: New Potential for New Models. — 2003. — 349 p.
2. Hickey R., Burns E. Development of a Statewide Erosion Vulnerability Screening Tool for Oregon: NY, 2005. — 450 p.
3. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning // Agriculture Handbook U.S. Department of Agriculture. — Washington, DC. — 1978. — № 537. — 543 p.
4. Moore I., Burch G. Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation // Soil Science Society of America Journal. — 1986. — № 50:1294–1298. — 250 p.

Поступила 22.06.2010

Данная статья публикуется в редакции автора.