

## МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4.013(470.44/.47)

© 2016 г. А.С. РУЛЕВ, В.Г. ЮФЕРЕВ

МАТЕМАТИКО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭРОЗИОННЫХ ЛАНДШАФТОВ*ФГБНУ “ВНИИЛМИ”, Волгоград, Россия  
e-mail: rulev54@rambler.ru, vyuferev1@rambler.ru*

Проведено математико-геоморфологическое моделирование эрозионных ландшафтов южной части Приволжской возвышенности, ограниченной междуречьем рек Волга и Иловля. Для определения геоморфологических особенностей склонов построена цифровая модель меридионального профиля участка Приволжской возвышенности. Эта модель позволяет рассчитать статистические параметры рельефа: высоты, уклоны, расстояния. Большинство профилей склонов возвышенностей имеет форму S-образной кривой, которая с высоким коэффициентом корреляции ( $> 0.995$ ) описывается уравнением логистической функции, представленной в нормированных величинах:

$$h(l) = (100 - 5t)/(1 + 69.7 \cdot \exp((0.434 - 0.033t) \cdot l + (2.59t - 35))) + 5t,$$

где  $h(l)$  – текущая высота профиля, %; 69.7 – коэффициент, определяющий положение центра масс системы “высота – протяженность – форма склона”; 0.434 и 0.033 – коэффициенты, определяющие, соответственно, форму и наклон кривой;  $l$  – ширина сечения профиля, %;  $t$  – период нормированного времени. Использование таких моделей дает возможность выявить наиболее опасные участки ландшафта на исследуемой территории, выявить форму склона и точки перегиба рельефа и, в результате, перейти к трассированию размещения защитных сооружений и лесных насаждений.

**Ключевые слова:** цифровая модель, геозекосистема, Приволжская возвышенность.

## Введение

Приволжская возвышенность расположена на правобережье Волги от Нижнего Новгорода до Волгограда. Южнее Камышина Приволжская возвышенность постепенно снижается, и у Волгограда основной фон создают поверхности с высотами от 110 до 150 м. Ширина Приволжской возвышенности в южной части не превышает 60 км.

По Приволжской возвышенности проходит Волжско-Донской водораздел. В южной части водораздельная линия подходит к Волге почти плотную, так что волжский и донской склоны оказываются неодинаково развитыми.

Современный рельеф Приволжской возвышенности (картографическая модель представлена на рис. 1) характеризуется следующими основными чертами: 1) наличием денудационных ступеней (уровней), 2) сильной эрозионной расчлененностью, 3) ярко выраженными структурными формами рельефа [1].

В пределах Волго-Иловлинского междуречья имеется два денудационных уровня, высоты которых уменьшаются в южном направлении. Так, верхнее плато между Саратовом и Камышином имеет высоты 240–260 м, южнее Камышина – 200–210 м, а еще южнее в рельефе совсем не сохранилось [2]. Высота нижнего плато южнее Камышина 150–200 и 170–180 м в районе Волгограда. Хорошо выраженный уступ высотой от 40 в

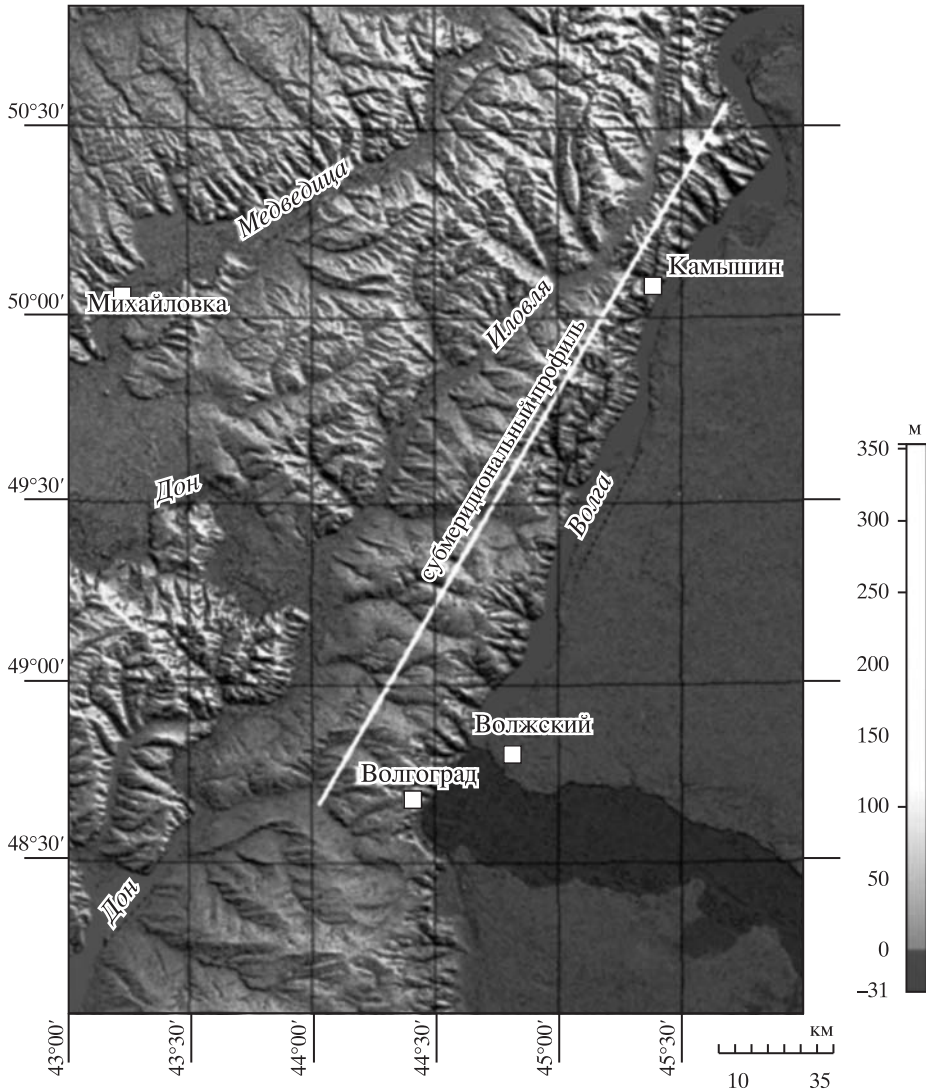


Рис. 1. Карта современного рельефа юга Приволжской возвышенности

южной до 100 м в северной своих частях разделяет верхнее и нижнее плато. Углы наклона склона уступа достигают 15°.

Характерной особенностью рельефа Приволжской возвышенности является ее расчлененность. Она неодинакова на волжском и донском склонах, что объясняется разной высотой склонов над базисом эрозии и разной их протяженностью. Особенно энергично эрозионные процессы протекают на волжском склоне. Вследствие резких контрастов высот враги волжского склона очень глубоки, ветвисты и интенсивно развиваются. Современные верховья оврагов волжского бассейна характеризуются резкими очертаниями, а глубина их достигает 60–100 м.

В связи с тем, что современные эрозионные процессы более энергично протекают на волжском склоне, то происходит перемещение водораздела с востока на запад и перехват рек донской системы реками бассейна Волги.

На возвышенности широко развиты куэсты – вытянутые гряды с несимметричными, пологими и крутыми склонами, сложенные полого падающими, разными по стойкости

пластами. Куэсты бронируются твердыми породами – мергелями, песчаниками, железистыми песчаниками и другими, в то время как их нижняя часть и понижения между ними слагают мягкие, легко размываемые породы [3].

Особенности рельефа, обилие легко размываемых пород, слагающих изучаемую территорию, в совокупности с глубоким базисом эрозии (до 300 м), определяют высокую эрозионную опасность и высокую расчлененность. Средняя расчлененность овражно-балочной сетью составляет 0.4–1.0, в отдельных местах достигая 3.0–3.5 км/км<sup>2</sup> и более. Глубина вреза эрозионной сети колеблется от 40 до 120 м.

Деградацию ландшафтов в результате водной эрозии, активную на данной территории, не сдерживают даже противозерозионные сооружения, что свидетельствует об актуальности дальнейшего изучения этой проблемы, необходимости выявления способствующих эрозии факторов и разработки на современном уровне противозерозионных мероприятий.

### **Методология и методика**

Картографирование и моделирование деградации ландшафтов в результате водной эрозии, выбор эрозионноопасных объектов проводились с использованием компьютерных и геоинформационных технологий и на основе анализа аэрокосмической информации, особенно космоснимков деградивовавших ландшафтов [4].

Потенциально опасными с точки зрения развития эрозионных процессов являются:

- предрасположенные к водной эрозии поверхности, наклоненные под углами более 1°;
- открытые, не защищенные от ветровой эрозии лесными насаждениями приводораздельные, природно-антропогенные и антропогенно-трансформированные ландшафты без растительного покрова;
- интенсивно используемые сельскохозяйственные территории (пашня, пастбища) с антропогенной нагрузкой, превышающей допустимую продуктивность, при отсутствии систем мелиорации;
- ландшафты с природными неблагоприятными условиями, а именно: засушливость климата, обедненные почвы (слабогумусированные супеси и пески), наличие соленых грунтовых вод, приводящих к образованию солончаков и др.;
- ландшафты, нарушенные природно-антропогенными “катастрофами”, такими как сели, наводнения, ураганы, затяжные ливни и др.

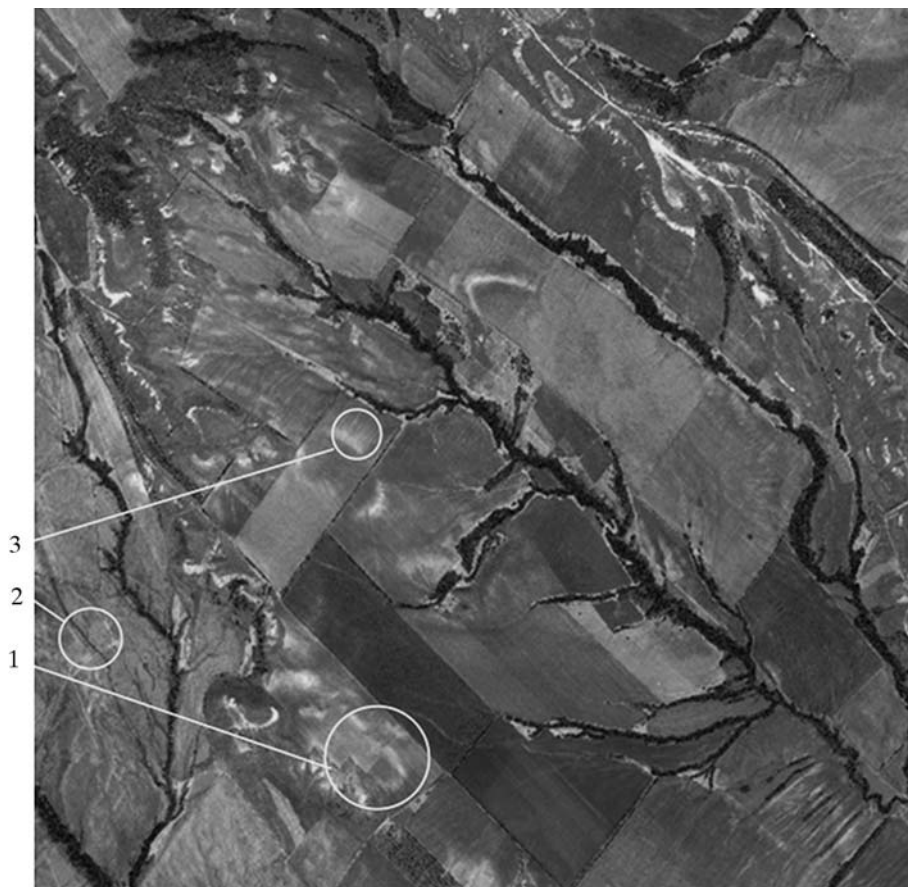
Содержание, а, следовательно, способы создания тематических карт и моделей различны для отдельных составляющих ландшафта. Так, для пашни главным является ее плодородие, определяемое типом почвы и содержанием в ней органических и минеральных веществ, для пастбищ – состав и состояние травянистого покрова, для лесных насаждений важны сохранность и состояние древостоя.

При картографировании и моделировании эрозионного ландшафта следует определить степень его деградации. Инструментом, дающим возможность анализа и картографирования, служит статистическая оценка параметров ландшафтов, проводимая с использованием космической информации. Это дает возможность устойчивой корреляции состояния ландшафтов с их расположением в пространстве.

Для определения вида деградации, степени (уровня) нарушенности ландшафта, уточнения координат очагов, количественной оценки состояния (полога лесных насаждений, содержания гумуса и смытости почв на пашне, проективного покрытия травянистой растительностью пастбищ) необходимы подробные космокарты (крупного масштаба – 1 : 10 000, 1 : 25 000).

Существующие планы и карты отличаются ограниченностью информации и некоторой условностью. Космокарты отражают реальные размеры объектов и позволяют оценить их состояние на момент съемки.

Создание космокарты (космоплана) эрозионного ландшафта в геоинформационной системе заключается в выделении на обзорной космокарте объекта исследований, опре-



*Рис. 2. Космоснимок эрозийного ландшафта на полигоне “Вторая Ураковка” (спутник GeoEye, 2012 г.) Цифрами обозначены дешифровочные признаки: 1 – изменения тона изображения, обусловленные различиями отражательной способности почв и растительности, 2 – формы ярко выраженной линейной эрозии (промоины, овраги, балки, долины), 3 – плоскостной смыв, отображаемый на снимках вытянутыми вниз по склону пятнами светлого тона*

делении его координат, общей площади и периметра. При необходимости устанавливается расстояние до контрольных пунктов, проводится оконтуривание и привязка контура к координатам. Затем создается новый тематический слой: “объект исследований”.

В зависимости от задачи полученная космокарта трансформируется до нужного масштаба и проекции или создания локальной крупномасштабной космокарты объекта исследований. При этом необходимо учитывать, что разрешение исходных космоснимков, используемых при создании обзорной космокарты в цифровом виде, должно обеспечивать соответствующее укрупнение масштаба обзорной космокарты.

После цифровой космокарты объекта исследований создается электронная база необходимой атрибутивной информации, уточняются географические координаты, производится оформление в соответствии с установленными требованиями. Результаты картографирования могут быть представлены в электронном и печатном видах.

Таким образом, использование космоснимков для создания на их основе космокарт ландшафтов, в том числе и при выявлении очагов деградации, служит обоснованным методическим приемом, позволяющим выявить не только такие очаги, но и другие особенности, которые отображены на космоснимках.

На космоснимках (рис. 2) дешифровочными признаками эрозийных процессов служат:

– изменение тона на изображении, которое обусловлено различной отражательной способностью как почв, так и растительности, приуроченной к этим почвам (1 на рис. 2);

– рисунок изображения, характерный для линейной эрозии, которая четко выделяется на снимках по характеру расчленения земной поверхности и наличию различных эрозионных форм: промоин, оврагов, балок, долин (2 на рис. 2);

– рисунок плоскостного смыва, отображаемый на снимках вытянутыми вниз по склону пятнами более светлого тона (3 на рис. 2).

Информация о деградации содержится в оцифрованном изображении в виде пикселей различного тона. Исследования распределения пикселей по значению фототона позволяют коррелировать их с количественными характеристиками объекта мониторинга.

Визуальный анализ позволяет на основании дешифровочных признаков выявить основные очаги деградации, природные и искусственные образования, гидрографическую сеть (отдельные водоемы), дороги и др.

При визуальном анализе необходимо определить границы очагов деградации и других выделяющихся объектов, расположение которых на снимке носит временный (разливы рек, облачность) или постоянный, но кардинально отличающийся от окружающей обстановки характер (выходы коренных пород, корковые солончаки и др.). При этом проводится выделение всех дешифрируемых объектов контурами и их классификация.

Компьютерный анализ выделенных контуров, отнесенных к определенным дешифрируемым (визуальным) группам, основан на исследовании распределения пикселей уже в этом выделенном контуре на космокарте объекта исследований.

Исходя из того, что выделенный контур достаточно точно определяет границы однородного объекта, можно все пиксели этого контура отнести к характеристике этого объекта. Однако, при последующем анализе, часть пикселей будет не учтена, так как они могут принадлежать к группам пикселей, соответствующим по значению фототона граничным объектам. Граничными являются объекты, которые лежат внутри контура, а значения фототона пикселей лежат внутри диапазона фототона, определяющего объект исследований.

Распределение пикселей на изображении однородного объекта количественно определяет параметры этого объекта и строится в виде гистограммы с установлением количества пикселей, приходящихся на каждый тон. Для компьютерной графики установлено 256 тонов по шкале серого (или любого другого основного) цвета. Если известны площадь участка и общее количество пикселей, то легко определить площади объектов, относящихся к каждому из 256 тонов изображения, то есть задача отнесения площади исследуемого объекта к определенному тону решается количественно.

Современные картографические исследования ландшафтов осуществляются с использованием цифровых моделей рельефа. Цифровая модель рельефа может быть использована для картографирования ландшафта. Ее возможно визуализировать как изолинейной картой высот, так и трехмерным видом с использованием геоинформационных картографических и моделирующих программ, таких как ArcGIS, MapInfo, GlobalMapper, Surfer и др. В настоящее время доступны несколько глобальных цифровых моделей рельефа, полученные при помощи радарного обследования поверхности земли. Наиболее приемлемы для решения задач математико-геоморфологического моделирования эрозионных ландшафтов цифровые модели SRTM-1 (регулярная сетка высот с шагом 1''), SRTM-3 (регулярная сетка высот с шагом 3'') и ASTER GDEM (регулярная сетка высот с шагом 1''). Эти модели легко внедряются в разрабатываемые геоинформационные системы. При необходимости повышения точности этих моделей, представляющих собой электронные таблицы, их можно корректировать для локальных территорий с использованием данных ГЛОНАС, топографических карт и др.

## Моделирование ландшафтов

Математико-геоморфологическое моделирование ландшафтов как совокупности определенных свойств рельефа, почв, растительности, литологии, климатических условий и сельскохозяйственных угодий служит необходимым условием создания модели их эрозионной деградации и обусловлено тесной связью между параметрами ландшафта и процессами в них протекающими.

Моделирование ландшафтов служит основой для выявления существующего эрозионного рельефа, так как отражает уже сложившуюся в течение определенного времени обстановку, а также при установлении устойчивых зависимостей, дает возможность прогноза эрозионного состояния таких ландшафтов [5, 6, 10, 11]. В связи с этим нам представляется интересным определение математическими методами характеристик эрозионных процессов на склонах [7].

Методология построения математической модели основана на исследованиях [8], в которых выдвинуты и обоснованы теоретические и методологические подходы к разработке моделей эрозионных процессов. Однако предложенная ранее модель не содержит привязки к центру масс системы “высота – протяженность – форма склона”, что по нашему мнению снижает эффективность моделирования. В связи с этим предлагается модифицированная модель рассматриваемой системы с учетом ее привязки к центру масс. Форма поперечного сечения балочного склона определяется гравитационными и гидродинамическими процессами, близка к форме логистической кривой.

Опытным путем установлено, что большинство профилей склонов (точнее линия профиля склона от водораздела до тальвега) имеет форму S-образной кривой, которая с высоким коэффициентом корреляции ( $>0.995$ ) описывается уравнением логистической функции в нормированных величинах:

$$h(l) = 100/1 + A \cdot \exp(B \cdot l + C), \quad (1)$$

где  $h(l)$  – текущая высота профиля, %;  $A$  – коэффициент, определяющий положение центра масс системы “высота – протяженность – форма склона”;  $B$ ,  $C$  – коэффициенты, определяющие форму и наклон кривой;  $l$  – ширина сечения профиля, %.

В работе [7] рассмотрена логистическая кривая, упрощенно моделирующая склон без учета коэффициента ( $A$ , формула 3), определяющего положение центра “тяжести” подынтегральной площади. Этот коэффициент численно соответствует уровню (высоте) склона, при котором уклон наклона склона равен 0. Вычисленный на основе анализа эволюции склона и при принятых краевых условиях, коэффициент равен 69.7.

Для прогноза состояния почв в ландшафтах мы применяем логистический анализ (анализ логистической функции) изменений формы склона и переноса твердых частиц от вершины к подножию.

Исходя из принятых допущений, что весь объем твердого материала остается в рассматриваемом профиле, за краевые условия принимаем равенство площадей подынтегральных кривых, отнесенных к различным периодам времени (рис. 3).

Принимая равенство площадей сечения рассматриваемых профилей склона, мы можем определить перемещение в пространстве твердых частиц из одного положения в другое. При этом предполагаем, что форма склона описывается логистической функцией.

Исследование динамики изменения формы склона показало, что зависимость коэффициентов  $B$  и  $C$  от периодов нормированного времени носит линейный характер:

$$B_i = B_0 - (0.033t), \quad (2)$$

$$C_i = C_0 + (2.59t), \quad (3)$$

где  $t = 0, 1, 2, \dots, i$ ;  $B_0 = 0.434$ ;  $C_0 = -35$ .

Коэффициент  $A$ , как было сказано выше, является постоянным и равен 69.7. С учетом приведенных выше допущений уравнение (1) запишется в виде:

$$h(l) = ((100 - 5t)/(1 + 69.7 \cdot \exp((0.434 - 0.033t) \cdot l + (2.59t - 35))) + 5t. \quad (4)$$

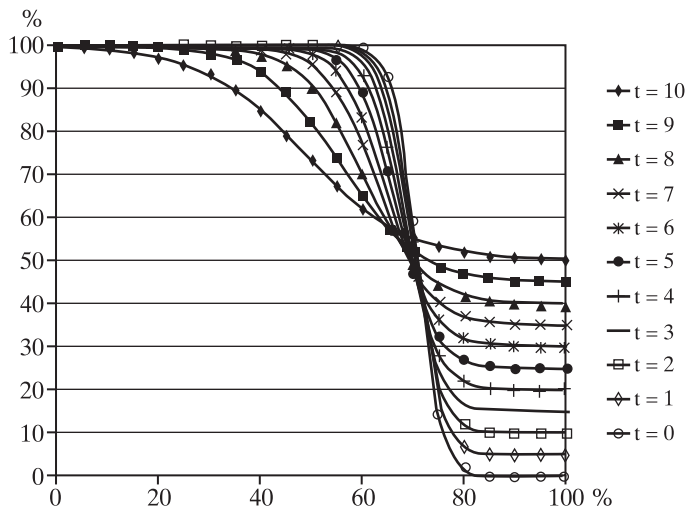


Рис. 3. Изменение профиля склона по периодам времени (справа – временные интервалы)

Математико-геоморфологическая модель позволяет прогнозировать эрозионную опасность склонов, и изменения формы склона, а также проводить исследования изменения величины уклона (первая производная) по протяженности склона. Проводя анализ третьей и последующих производных возможно определить верхнюю и нижнюю границы зон переходов между устойчивыми (неэрозионноопасными) и неустойчивыми (эрозионноопасными) участками склонов.

Изучение особенностей рельефа по разработанной цифровой модели дает возможность разработать аналитические зависимости для описания устойчиво повторяющихся закономерностей, рассчитать уклоны и длину склонов в любом направлении, что является основой для создания ландшафтных и мелиоративных планов.

### Обсуждение результатов

В южной части Приволжской возвышенности, ограниченной междуречьем рек Волга и Иловля с общей площадью 1156 тыс. га, преобладающими являются территории с высотами 50–150 м, занимающие около 80% этой площади.

Из них площадь территорий на высотах от 110 до 130 м, составляет 250 тыс. га или около 22%. Минимальная высота 31 м, максимальная – 270 м, средняя – 104.9 м, стандартное отклонение – 41.1 м.

Имеющиеся в современных программных комплексах математические функции обеспечивают как цифровое описание расчетных характеристик рельефа, так и визуализацию этих расчетов [9]. Это дает возможность построить карты уклонов. Анализ таких карт показал, что основной фон составляют территории с уклонами от 0 до 3°, среднее значение 1.6°, стандартное отклонение 1.7°. Такая карта обеспечивает выявление наиболее расчлененных территорий и выбор объектов для дальнейшей разработки планов по их противозэрозионному обустройству.

Площадь ландшафтной катены Иловлинского водосбора 776 570 га. При протяженности притоков 1, 2 и 3 порядков 1937.8 км общая расчлененность составляет 0.25 км/км. Площадь волжского водосбора 420230 га, протяженность тальвегов 1634.1 км, общая расчлененность 0.39 км/км.

Судить о геоморфологических особенностях склонов можно по приводимой здесь цифровой модели субмеридионального участка (азимут 26°27'10'') профиля Приволжской возвышенности (рис. 4). Эта модель не только наглядно показывает размещение склонов вдоль профиля в направлении на юго-запад, но и позволяет рассчитать статисти-

Первые производные логистической функции по длине сечения профиля склона в периоды времени  $t$  покажут положения точек перегиба, которые определяют изменение интенсивности эрозионного процесса.

Анализ положения точек перегиба показывает, что с изменением нормированного периода времени от 0 до 10 происходит их смещение вверх, что соответствует снижению интенсивности эрозионных процессов на склонах.

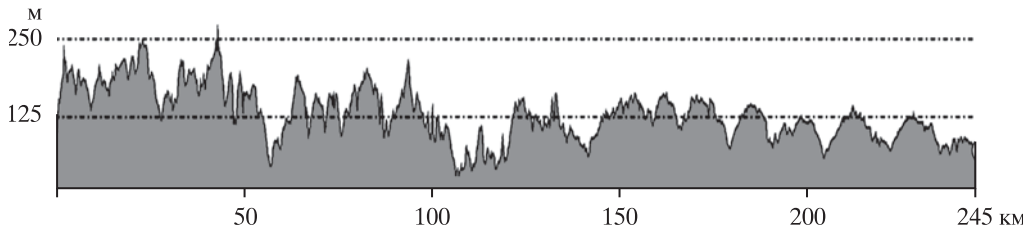


Рис. 4. Цифровой профиль участка Приволжской возвышенности СВ – ЮЗ  
По оси ординат показана абс. высота, по оси абсцисс – расстояние от начала профиля

ческие параметры рельефа. Высота в начале профиля 127.9 м, в конце – 57.0 м; длина профиля 245.1 км; перепад высот по профилю 241.3 м; минимальная высота по профилю 31 м, максимальная – 272.3 м; общий наклон поверхности 0.02°; максимальный угол наклона поверхности 10.52° (100.5 км вдоль линии профиля).

Для определения характерного изменения поверхности катены по направлению от тальвега р. Иловля к Волго-Иловлинскому водоразделу была также разработана цифровая модель соответствующего профиля. Высота в начале профиля 74.0 м и 176.7 м – в конце. Длина профиля 19.2 км; перепад высот по профилю 102.7 м; минимальная высота 58.8 м, максимальная – 209.2 м. Общий наклон поверхности 0.31°; максимальный угол наклона поверхности 20.31° (14.4 км – вдоль линии профиля).

Уравнение, описывающее изменение высоты ( $H$ , м) по протяженности ( $x$ , км) этого профиля при достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.921$ , может быть представлено в экспоненциальном виде:

$$H = 64.242e^{0.0559x}. \quad (5)$$

Характер ландшафтной катены волжского водосбора от водораздела к тальвегу по своим геоморфологическим характеристикам отличен от ландшафтной катены Иловлинского водосбора, где преобладают склоны выпуклой формы. Поэтому был построен соответствующий профиль длиной 21.12 км, и проведены исследования изменения высоты рельефа ( $H$ , м) по протяженности склона ( $x$ , км). Высота в начале профиля 178 м; перепад высот по профилю 163.7 м. Минимальная высота по профилю 9.0 м; максимальная – 213.6 м; общий наклон поверхности 0.47°; максимальный угол наклона поверхности 34.72° (10.3 км вдоль линии профиля).

Для исследуемого профиля характерны относительно плоская часть с общим уклоном в сторону тальвега  $<0.15^\circ$  и склоновая – протяженностью около 5 км с углом наклона  $1.58^\circ$ . Анализ распределения высот позволил вывести логистическое уравнение при достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.899$  в виде:

$$H = 18.7(1 - \exp(0.174x)) + 210. \quad (6)$$

Использование таких моделей дает возможность выявить наиболее опасные участки исследуемой территории, выявить форму склона и точки перегиба рельефа и в результате перейти к планированию размещения защитных сооружений и лесных насаждений.

### Заключение

Математико-геоморфологическое моделирование эрозийных ландшафтов; анализ их структуры и динамики с применением геоинформационной среды; использование космокарт, разработанных на основе космоснимков высокого разрешения и ЦМР, дают возможность выявить основные характеристики ландшафтов в режиме реального времени и использовать их как основу для теоретических и экспериментальных исследований эколого-геоморфологических процессов. Таким образом, мы получаем современный инструмент изучения процессов, определяющих состояние и степень развития ландшафтов.

Цифровые модели рельефа и космоснимки во взаимосвязи с геокодированной информацией позволяют выявить особо важные характеристики ландшафтов с учетом



их приуроченности к различным элементам рельефа, проследить изменения и спрогнозировать последствия природно-антропогенного и антропогенного воздействия на геозкосистемы.

Информационное обеспечение картографирования ландшафтов может быть обеспечено геоинформационной картографической и топологической базой данных, подбором и оцифровыванием топографических и тематических карт, созданием атрибутивных баз для описания свойств объекта, а также использованием существующих распределенных и локальных баз данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карандеева М.В. Геоморфология европейской части СССР. М.: Изд-во МГУ, 1957. 314 с.
2. Дедков А.П. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во КазГУ, 1984. 264 с.
3. Бастраков Г.В. Эрозионная прочность горных пород // Геоморфология. 1977. № 2. С. 52–55.
4. Юферев В.Г., Кулик К.Н., Рулев А.С., Мушаева К.Б., Кошелева А.В., Дорохина З.П., Березовицкая О.Ю. Геоинформационные технологии в агролесомелиорации. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2010. 102 с.
5. Трофимов А.М., Московкин В.М. Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во КазГУ, 1983. 219 с.
6. Тикунов В.С. Моделирование в картографии. М.: Изд-во МГУ, 1997. 405 с.
7. Гаршинев Е.А. Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: теория и модели. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1999. 196 с.
8. Казанский Б.А. Роль уравнения диффузии в математической геоморфологии // Геоморфология. 1990. № 2. С. 20–26.
9. Рулев А.С., Юферев В.Г. Картографо-геоинформационное моделирование в агролесомелиорации // Математические модели и информационные технологии в сельскохозяйственной биологии: итоги и перспективы / Мат-лы Всерос. конф. (с междунар. участием). СПб.: АФИ, 2010. С. 68–71.
10. Керженцев А.С., Майснер Р., Демидов В.В., Олеш Г., Сухановский Ю.П., Волокитин М.П., Кистнер И., Коломийцев Н.В., Роде М., Сон Б.К., Быховец С.С., Демин Д.В., Пискунов А.Н., Ильина Т.А., Киселева О.Е. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна. М.: Наука, 2006. 224 с.
11. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. М.: Науч. мир, 2003. 104 с.

Поступила в редакцию 16.06.2015

#### MATHEMATICAL AND GEOMORPHOLOGICAL MODELING OF THE EROSION LANDSCAPES

A.S. RULEV, V.G. YUFEREV

*All-Russian Scientific Research Agroforestry Institute, Volgograd, Russia,  
rulev54@rambler.ru; vyuferev1@rambler.ru*

#### Summary

The identifying of characteristics of the landscape with regard to their belonging to various elements of the relief, the determination of the changes in time and space, the consequences forecast of natural-anthropogenic and anthropogenic impacts on geoecosystem are conducted as a result of the mathematical and geomorphological modeling of the landscapes subjected to erosion and the use geographic information for analysis of degradation. GIS modeling and mapping are carried out taking into account many-sided information from distributed and concentrated databases, high-resolution satellite imagery, space map and DEM. The authors developed a modified model of the system "Height – Shape slope – Length" in view of its reference to the center of mass. It was found that most of the slopes profile has the view of an S-shaped curve, which is described by the logistic function provided in normalized values with a high correlation coefficient (more than 0.995)

$$h(l) = (100 - 5l) / (1 + 69.7 \cdot \exp((0.434 - 0.033l) \cdot l + (2.59l - 35))) + 5l.$$

where:  $h(l)$  – current height of a profile, %; 69.7 – coefficient determining the position of the mass center system “Height – Length – Shape slope”; 0.434 and 0.033 – factors that determine the shape and incline of the curve;  $l$  – the width of the profile section, %;  $t$  – the period of normalized time.

At that, digital models of status and dynamics of relief in connection with the geocoded information, and the space images of the studied surface of allow to determine the spatial disposition, shape and topology of geocoecosystems. Modeling of landscapes is the basis for identifying the existing erosion relief, as it reflects already established, for some time, situation, as well as when identifying stable relationships allows predicting the erosion state of such landscapes.

**Keywords:** digital model, geocoecosystem, the Volga Upland.

doi:10.15356/0435–4281–2016–3–36–45

УДК 551.438.5(470.323)

© 2016 г. С.В. ХАРЧЕНКО

## ОПЫТ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА НА АЭРАЦИЮ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

*ФГАОУ ВО “Казанский федеральный университет”, Казань, Россия  
e-mail: xar4enkkoff@rambler.ru*

Аэрационные свойства застройки являются одной из важных характеристик городской среды. Для количественной оценки влияния, которое оказывает рельеф земной поверхности на аэрацию кварталов застройки, используется технология CFD (вычислительной гидродинамики, computation fluid dynamics), реализованная в программе UrbaWind. Необходимый этап CFD-моделирования – построение геометрически корректного отображения реальной местности, включающего в себя топографическую поверхность, застройку, крупные скопления древесной растительности. Вводные данные для CFD-моделирования требуют применения цифровых моделей рельефа и застройки и полевых ветромерных измерений (для верификации компьютерной модели). Результаты моделирования обрабатываются при помощи методов математической статистики. Проведена оценка влияния рельефа на аэрацию двух участков жилой застройки в г. Курск: группа разноэтажных кварталов к северу от исторического центра г. Курска, включая фрагмент долины р. Кур; и участок на подсыпанном фрагменте поймы р. Тускарь, который ранее принадлежал т. н. “Ямской слободе”. Влияние рельефа на аэрацию кварталов городской застройки можно количественно выразить путем сравнения вычисленных параметров ветрового потока по разным направлениям – для условий идеальной плоской поверхности и для реального рельефа. Это сравнение удобно проводить с использованием коэффициента  $R$  парной корреляции Пирсона для параметров ветра в соответствующих узлах расчетной сетки для двух “обстановок рельефа”. На территориях, взятых в качестве примеров, минимальные показатели  $R$  характерны для более расчлененной поверхности первого участка и соответствуют, во-первых, генеральному направлению уклона всего участка, во-вторых, направлению уклона наиболее крутосклонной площадки – циркообразного фрагмента эрозионного уступа долины р. Кур. Морфология земной поверхности даже в условиях равнин оказывает весьма существенное влияние на аэрацию территории.

**Ключевые слова:** рельеф городской территории, аэрация жилой застройки, оценка, CFD-моделирование.

### Введение

Роль рельефа как фактора ветровой обстановки вплоть до недавнего времени изучалась, прежде всего, для проектирования отдельных ветроэнергетических установок и их систем [1–4]. В последние годы все более популярным (по ряду причин) становится анализ влияния рельефа, в том числе архитектурного, на аэрацию городских кварталов [5, 6]. Для высокой линейно вытянутой группы зданий с “понижением” улицы между ними был введен даже специальный термин – “уличный каньон” (street canyon) или, реже, “городской каньон” (urban canyon – понятие впервые определено, по-видимому, в [7, 8]). В этих терминах трудно не заметить аналогий с геоморфологической категорией – каньон.