ИСПОЛЬЗОВАНИЕ TIN-МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ОПОЛЗНЕВОГО МАССИВА И АНАЛИЗА ЕГО ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

Исаев Е.А

“Ахангаранцемент”, Адрес: 110300, Город Ахангаран, Ташкентская область, Республика Узбекистан

Tel: +998 90 016 86 58

Туйчибоев Э. И.

Филиал Национального исследовательского технологического университета "МИСиС" Адрес: 110100, Республика Узбекистан, Ташкентская область, город Алмалык, улица Амира Темура, дом 56

Каримов Ш. В.

Филиал Национального исследовательского технологического университета "МИСиС" Адрес: 110100, Республика Узбекистан, Ташкентская область, город Алмалык, улица Амира Темура, дом 56

E-mail: tei050599@gmail.com

Tel: +998935823263

Annotation. The article examines the use of a digital terrain model constructed on the basis of a Triangulated Irregular Network (TIN) for a comprehensive analysis of the geomechanical condition of a landslide body and the quantitative assessment of its spatial dynamics. The application of a TIN model enables highly detailed reconstruction of surface morphology and detection of minute elevation changes resulting from ongoing deformation processes. The methodology for constructing the model relies on the integration of mine surveying and high-precision geodetic measurements, ensuring reliable geometric approximation of surface displacements and eliminating distortions typical of regular grids. The coordinates of the landslide mass center were determined using an integral method over the ensemble of triangular elemental volumes, which made it possible to trace the displacement of the centroid during different observation periods. Analysis of the center-of-mass movement allowed identification of the displacement vector direction, which coincides with the zone of maximum slope gradient and reflects the most probable trajectory of the landslide’s further evolution. The TIN model also facilitated the detection of local deformation zones, assessment of elevation heterogeneity, and identification of geomechanically weakened areas. The obtained results confirm the high efficiency of TIN-based models in studying the spatial structure and kinematics of landslide bodies. This approach provides a reliable basis for forecasting deformation development, assessing slope stability, and designing engineering measures to prevent hazardous geodynamic processes.

ISSN 3030-3907

Keywords: landslide body, geomechanical state, TIN model, center of mass, displacement trajectory, digital modeling, mine surveying, 3D geometry.

Annotatsiya. Maqolada triangulyatsiyalangan notekis tarmoq (TIN) asosida yaratilgan raqamli relyef modeli yordamida ko‘chki massasining geomekanik holatini kompleks tahlil qilish hamda uning fazoviy dinamikasining miqdoriy parametrlarini baholash masalalari ko‘rib chiqiladi. TIN-modeldan foydalanish relyef morfologiyasini yuqori aniqlikda qayta tiklash va deformatsiya jarayonlari natijasida yuzaga keladigan eng kichik balandlik o‘zgarishlarini aniqlash imkonini beradi. Modelni qurish metodikasi marksheyderlik va yuqori aniqlikdagi geodezik kuzatuvlarning integratsiyasiga asoslanadi, bu esa sirt siljishlarining geometrik approksimatsiyasining ishonchliligini ta’minlaydi va muntazam tarmoqlarga xos bo‘lgan buzilishlarni bartaraf etadi. Ko‘chki massasining og‘irlik markazi koordinatalari uchburchakli elementar hajmlar yig‘indisi bo‘yicha integral usulda aniqlanib, turli kuzatuv davrlarida markazning siljish trayektoriyasini belgilash imkonini berdi. Og‘irlik markazining siljishlarini tahlil qilish harakat vektori yo‘nalishini aniqlashga yordam berdi, u relyefning maksimal qiyalik gradienti bilan mos keladi va ko‘chki jarayonining keyingi rivojlanish yo‘nalishini ifodalaydi. TIN-model lokal deformatsiya zonalarini aniqlash, balandliklarning notekis taqsimlanishini baholash va geomekanik jihatdan zaif hududlarni ajratib ko‘rsatishga imkon berdi. Olingan natijalar TIN-modellarining ko‘chki jismlarining fazoviy tuzilishi va kinematikasini o‘rganishda yuqori samaradorlikka ega ekanligini tasdiqlaydi. Ushbu yondashuv deformatsiyalarni prognoz qilish, qiya yonbag‘irlar barqarorligini baholash va xavfli geodinamik jarayonlarning oldini olish bo‘yicha muhandislik choralarini ishlab chiqishda ishonchli asos yaratadi.

Kalit so‘zlar: opolzen massivi, geomekanik holat, TIN-model, massa markazi, siljish trajektoriyasi, raqamli modellashtirish, marksheyderlik kuzatuvlari, uch o‘lchamli geometriya.

Аннотация: В статье рассматривается применение цифровой модели рельефа, сформированной на основе триангуляционной нерегулярной сетки (TIN), для комплексного анализа геомеханического состояния оползневого массива и количественной оценки параметров его пространственной динамики. Использование TIN-модели позволяет с высокой степенью детализации реконструировать морфологию рельефа и фиксировать минимальные изменения высотных отметок, возникающие в результате развития деформационных процессов. Методика построения модели базируется на интеграции маркшейдерских и высокоточных геодезических наблюдений, что обеспечивает достоверность геометрической аппроксимации поверхностных смещений и исключает искажения,

ISSN 3030-3907

характерные для регулярных сеток. Определение координат центра масс оползневого тела выполнялось интегральным методом по совокупности элементарных объёмов треугольной сетки, что позволило выявить изменение положения центроидной точки в различные периоды наблюдений. Анализ смещений центра масс дал возможность установить направление вектора движения, которое совпадает с зоной максимального градиента уклона и характеризует наиболее вероятный путь дальнейшего развития оползневого процесса. TIN-модель также позволила выделить локальные деформационные участки, определить неоднородность распределения высот и выявить геомеханически ослабленные зоны. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения TIN-моделей при изучении пространственной структуры и кинематики оползневых тел. Такой подход обеспечивает объективную основу для прогноза развития деформаций, оценки устойчивости склонов и разработки инженерных мероприятий по предотвращению опасных геодинамических проявлений.

Ключевые слова: оползневой массив, геомеханическое состояние, TIN-модель, центр масс, траектория смещения, цифровое моделирование, маркшейдерские наблюдения, трёхмерная геометрия.

Введение

Изучение пространственной структуры оползневых массивов и закономерностей их смещения является ключевой задачей геомеханики при обеспечении устойчивости склонов и откосов в горнодобывающих районах. В условиях сложного рельефа, тектонической нарушенности и неоднородного распределения физико-механических свойств пород традиционные методы инженерно-геологических наблюдений не позволяют точно определить геометрию деформационной зоны и динамику перемещения массива. В связи с этим применение цифровых технологий, в частности триангуляционной нерегулярной сетки (TIN-модели), позволяет существенно повысить точность пространственной интерпретации деформационных процессов.

TIN-модель (Triangulated Irregular Network) представляет собой цифровое представление рельефа, формируемое на основе нерегулярного набора точек с известными координатами и высотами. В отличие от регулярных грид-моделей, она обеспечивает более детальное отображение локальных изменений рельефа и позволяет вычислять пространственные характеристики деформируемых участков, включая положение центра масс, направление и амплитуду смещения, а также границы активной зоны оползня. Применение TIN-модели в сочетании с маркшейдерскими

ISSN 3030-3907

наблюдениями создаёт основу для точного определения пространственного положения оползневого тела и построения его траектории движения [1].

Методы

Построение TIN-модели оползневого массива выполнялось на основе геодезических и маркшейдерских наблюдений, включающих результаты тахеометрической съёмки и GPS-измерений реперов, заложенных по гребню и телу оползня. Исходные координаты точек были преобразованы в единую локальную систему, что обеспечило сопоставимость данных при многократных циклах наблюдений. После удаления случайных выбросов и интерполяции пропущенных значений создавалась треугольная нерегулярная сетка, аппроксимирующая действительный рельеф поверхности смещения (рис 1).[2]

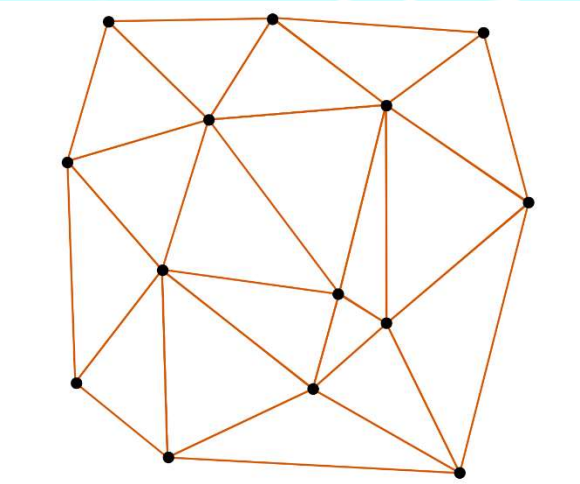


Рис. 1. Нерегулярная триангулированная сеть

Для формирования TIN-модели использовался алгоритм Делоне, обеспечивающий равномерное распределение треугольников и минимизацию углов искажений. В результате получалась пространственная поверхность, в которой каждая вершина имела известные координаты (x, y, z), а ребра отражали структурные границы между участками с различными высотами и уклонами. Это позволило выполнять локальные расчёты градиентов, выявлять линии перегиба рельефа и определять геометрические параметры потенциальных поверхностей скольжения [3]. Для более быстрого анализа для всего борта было использовано программное обеспечение MineFrame.

ISSN 3030-3907

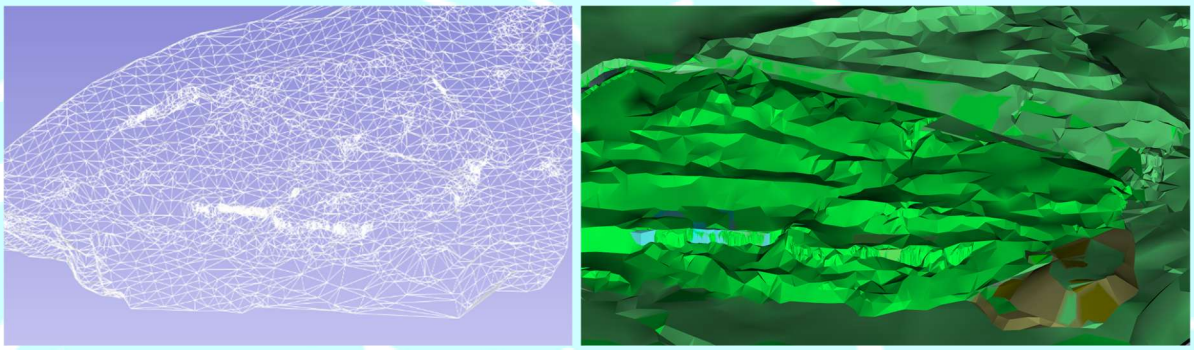


Рис 2. Tin моделеривание оползевого массива с помощью программного обеспечения MineFrame

Калибровка модели проводилась путём сопоставления расчётных отметок с фактическими данными нивелировок и лазерного сканирования. Для анализа направлений деформаций использовались векторные поля смещений, построенные на основе разности координат одноимённых точек между последовательными циклами наблюдений.

Определение центра масс осуществлялось по интегральной схеме, основанной на разбиении массива на элементарные призматические объёмы, соответствующие треугольным элементам TIN-сетки. Для каждого элемента вычислялись масса (с учётом плотности пород) и координаты центра тяжести, после чего производилось суммирование по всей поверхности.

Из курса высшей математики, векторного произведения векторов [4] при заданных вершинах треугольника, у которого координаты $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, $C(x_3, y_3)$, можно найти площадь треугольника по формуле:

$$S = \frac{1}{2}|(B-A)\times(C-A)| = \frac{1}{2}|AB \times AC| = \frac{1}{2}\begin{vmatrix} \bar{\imath} & \bar{\jmath} & \bar{k} \\ x_{AB} & y_{AB} & z_{AB} \\ x_{AC} & y_{AC} & z_{AC} \end{vmatrix} \quad (1)$$

Средняя высота треугольника:

$$h_{avg} = \frac{z_1+z_2+z_3}{3} \quad (2)$$

Объём каждого элемента рассчитывается как призма над базовой плоскостью.

Формула объёма призматического элемента:

$$V_i = S_i \cdot h_{avg} \quad (3)$$

Для каждого призматического треугольника координаты его центра масс в проекции находятся из курса высшей математики, согласно формулам [4]:

$$X_{ABC} = \frac{x_1+x_2+x_3}{3}; Y_{ABC} = \frac{y_1+y_2+y_3}{3}; Z_{ABC} = \frac{z_1+z_2+z_3}{3} - \frac{h_{\text{вск}}}{2} \quad (4)$$

ISSN 3030-3907

Координаты центра масс всего массива вычисляются как взвешенное среднее по массе полезного ископаемого и прилегающей на ней вскрыши из курса общей физики [5]:

$$X_C = \frac{\sum m_i \cdot X_{ci}}{\sum m_i}; Y_C = \frac{\sum m_i \cdot Y_{ci}}{\sum m_i}; Z_C = \frac{\sum m_i \cdot Z_{ci}}{\sum m_i} \quad (5)$$

где X_C, Y_C, Z_C— координаты центра масс каждого призматического элемента.

Полученный центр масс использовался как базовая точка для анализа траектории смещения в динамике наблюдений.

Результаты и обсуждение

TIN-модель позволила получить детализированное представление морфологии оползневого массива, включая распределение уклонов, направления максимальных градиентов и геометрию зоны смещения.

После определения координат центров масс отдельных блоков был сделан расчет общего центра масс для двух структурных групп (таблица 1):

- Группа 1 — Блоки №1, №2 и №3 с соответствующими участками вскрыши;
- Группа 2 — Блоки №4 и №5 с их вскрышными породами, включая влияние отвала, рассматриваемого как стабилизирующий контрбанкет (рис 3).

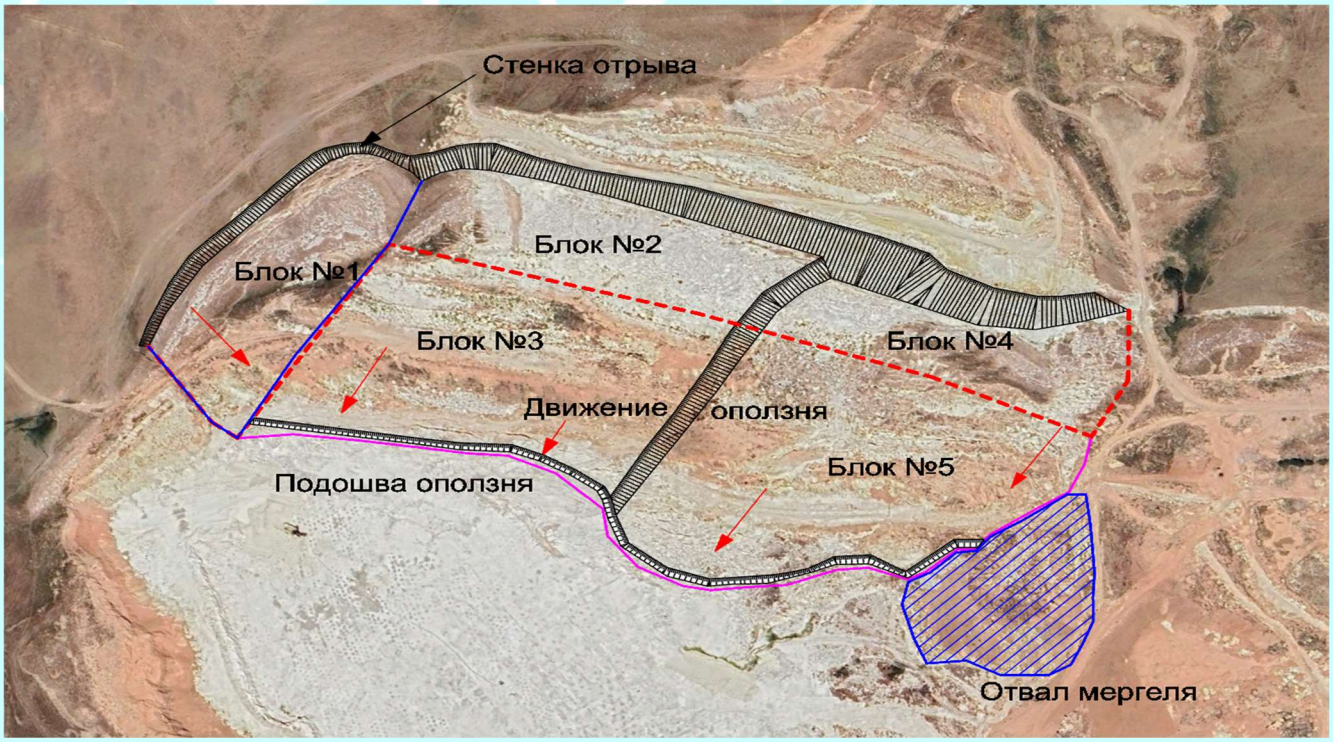


Рис. 3 Вид сверху: распределение массива на блок № 1-5

ISSN 3030-3907

Таблица 1

Центры масс для объединённых оползневых тел

Название блока	Центр масс (X)	Центр масс (Y)	Центр масс (Z)	Анализ и выводы
Объединённый Блок № 1-3	559146,23	538901,1	766,0	Центр масс смещён в сторону Блока 3, который имеет большую массу (особенно с учётом вскрыши).
Объединённый Блок №4-5	559378,34	538690,45	773,42	Высокое положение центра масс (773,4 м) при относительно небольшой площади опоры указывает на потенциальную вертикальную нестабильность.
Общий блок №1-5	559215,6	538858,6	765,1	Центр масс всей системы смещён в сторону блока 2–3, что подтверждает преобладание массы в верхней части массива. Высотное положение центра (765,1 м) относительно базы предполагает возможное развитие оползневого процесса при потере устойчивости нижней части. Требуется усиление удерживающей структуры (контрбанкетов) и мониторинг напряжённого состояния.

ISSN 3030-3907

Данный подход позволил учесть пространственное распределение массы по всему карьерному участку и оценить характер нагрузки на склон, а также взаимное влияние блоков при совместной работе массива.

Для визуализации пространственного положения центра тяжести всей оползневой системы на блочную модель были введены соответствующие координаты, указанные на таблице 1, полученные в результате расчёта центра масс по всем пяти блокам. Это позволило отразить фактическое положение равнодействующей массы на схеме и оценить направление возможного смещения массива. Также на рисунке 5 представлен борт карьера с отсыпанным отвалом.

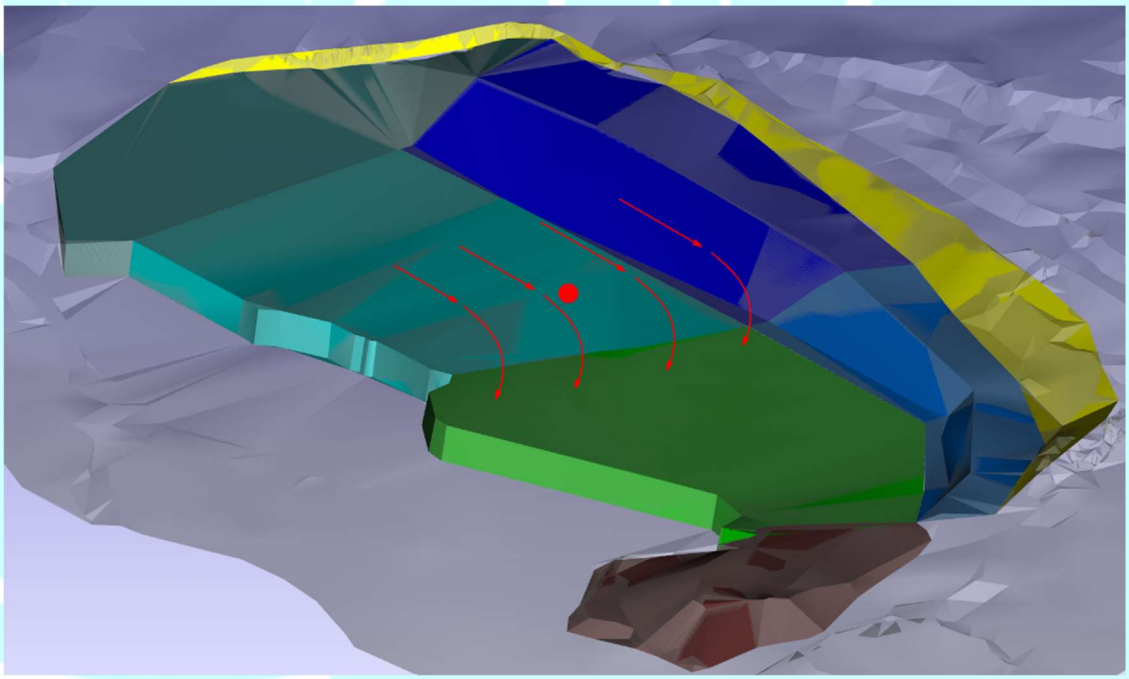


Рис. 4 Наглядное указание центра масс всей системы блоков с скручиванием

ISSN 3030-3907



Рис. 5. Фото борта карьера с отсыпанным отвалом

Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность TIN-модели к локальным изменениям рельефа. Она позволяет не только визуализировать оползневые процессы, но и количественно оценивать пространственные параметры смещений, что особенно важно при прогнозировании дальнейшей эволюции массива.

Заключение

Результаты анализа показали, что применение TIN-модели существенно повышает точность оценки геомеханического состояния склонов по сравнению с традиционными двумерными методами. Возможность трёхмерного представления массива обеспечивает комплексную интерпретацию деформационных процессов, включая определение направления движения центра масс, оценку его ускорений и выявление зон локальной нестабильности.

Определение центра масс оползневого тела имеет важное практическое значение: его перемещение относительно исходного положения отражает развитие деформаций в массиве и позволяет оценить степень риска последующего обрушения. Построенная траектория движения центра масс служит основой для прогноза дальнейших перемещений, что особенно актуально при разработке инженерных мероприятий по стабилизации склонов и проектировании контрфорсов или водоотводных сооружений.

Использование TIN-модели совместно с маркшейдерскими наблюдениями позволяет создать динамическую систему мониторинга, интегрирующую результаты полевых измерений и цифрового моделирования. Такая система способна не только фиксировать текущее

ISSN 3030-3907

состояние массива, но и прогнозировать его поведение во времени при изменении гидрогеологических условий или дополнительных нагрузках от горных работ.

Таким образом, построение и анализ TIN-модели оползневого массива обеспечивают высокую точность определения центра масс и направлений его смещения, позволяют проследить закономерности развития деформаций и служат эффективным инструментом для оценки геомеханической устойчивости природных и техногенных склонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Goodchild M. F., Mark D. M. The fractal nature of geographic phenomena // Annals of the Association of American Geographers. – 1987. – Vol. 77(2). – P. 265–278.
2. Peucker T. K., Fowler R. J., Little J. J., Mark D. M. Digital Terrain Models: Review and Prospects // The American Society for Photogrammetry. – 1978. – 516 p.
3. Jones K. A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM // Computers & Geosciences. – 1998. – Vol. 24(4). – P. 315–323.
4. Pismennyi D.T. Lectures on Higher Mathematics. Part 1. Moscow: Ayris-Press, 2008. – 606 p.
5. Saveliev I.V. Course of General Physics. Vol. 1: Mechanics. Moscow: Nauka, 1977. – 560 p.
6. Florinsky P. V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. – Amsterdam: Elsevier, 2012.
7. Hengl T., Reuter H. I. (eds.) Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009.
8. Wilson J. P., Gallant J. C. (eds.) Terrain Analysis: Principles and Applications. – New York: John Wiley & Sons, 2000.
9. Maune D. F. (ed.) Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. – 2nd ed. – Bethesda: ASPRS, 2007.
10. Burrough P. A., McDonnell R. A., Lloyd C. D. Principles of Geographical Information Systems. – 3rd ed. – Oxford: Oxford University Press, 2015.
11. Florinsky P. V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models // International Journal of Geographical Information Science. – 1998. – Vol. 12, No. 1. – P. 47–61.
12. Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P. GIS-based techniques for mapping landslide hazard // Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards / Ed. A. Carrara, F. Guzzetti. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. – P. 135–175.

ISSN 3030-3907

13. Montgomery D. R., Dietrich W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding // Water Resources Research. – 1994. – Vol. 30, No. 4. – P. 1153–1171.
14. Тикунов В. С. Геоинформатика: учебник для вузов. – М.: Академия, 2002.
15. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование: методы геоинформатики и цифровой обработки изображений. – М.: КДУ, 2007.
16. Кошкарёв А. В., Тикунов В. С., Красовский Г. Я. Геоинформационные системы: основы, методы, технологии. – М.: Академический проект, 2005.
17. Арманд Н. А., Флоринский П. В. Применение цифровых моделей рельефа для анализа устойчивости склонов // Геоморфология. – 2003. – № 4. – С. 45–56.

ISSN 3030-3907