

УДК 502.5/.8

© Д.О. Кривогуз

Д.О. Кривогуз

# МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРОСТРАНСТВЕННОМУ РЕГИОНАЛЬНОМУ АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕРРИТОРИИ К СКЛОНОВЫМ ПРОЦЕССАМ

Под устойчивостью территории к склоновым процессам следует понимать такое состояние территории, при котором совокупность факторов, оказывающих прямое или косвенное воздействие на территорию, не приводит к активизации существующих или формированию новых склоновых процессов.

В свою очередь, региональным анализом устойчивости территории к склоновым процессам можно считать комплекс действий, который направлен на получение численных показателей состояния территории относительно склоновых процессов.

Склоновый процесс математически можно описать как сумму вклада факторов, на него воздействующих (весовых коэффициентов). Таким образом, вклад факторов, оказывающих положительное воздействие и собственно приводящих к проявлению склоновых процессов будет находиться в интервале от 0 до  $\infty$ , в то время как вклад факторов, оказывающих сдерживающее воздействие на склоновые процессы, будет находиться в промежутке от  $-\infty$  до 0.

Региональный анализ устойчивости территории к склоновым процессам базируется на утверждении, что любой склоновый процесс в прошлом и настоящем описывает склоновые процессы в будущем. Это значит, что, поскольку склоновые процессы являются комплексным явлением, то основные факторы, их обуславливающие, будут на протяжении долгого времени неизменными.

С математической точки зрения, в данном случае следует отделить границу, при которой происходит переход от неустойчивого состояния устойчивости территории к устойчивой и наоборот. Поскольку при расчетах ее показателей, устойчивость территории может изменяться в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ , то границей этого перехода можно считать 0.

Полученные численные показатели устойчивости территории к склоновым процессам можно трактовать следующим образом:

$< -2$  – территории, характеризующиеся сильной устойчивостью. Совокупность факторов, влияющих на склоновые процессы, минимальна или

уровень воздействия факторов, способствующих устойчивости территории, преобладает над уровнем факторов, способствующих ее неустойчивости.

$-2... +2$  – нестабильные или переходные территории. Они характеризуются неоднозначным показателем устойчивости, что выражается в перекрытии уровня воздействия одних факторов другими. Даже при незначительном изменении уровня воздействия хотя бы одного из этих факторов, возможен переход состояния территории как в сторону устойчивости к склоновым процессам, так и наоборот.

$> 2$  – неустойчивые территории. Совокупность факторов, влияющих на склоновые процессы, максимальна или уровень воздействия факторов, способствующих неустойчивости территории, преобладает над уровнем факторов, способствующих ее устойчивости.

Общая схема проведения регионального анализа устойчивости территории к склоновым процессам представлена на рис. 1.

Данные, используемые для анализа, можно разделить на 3 группы:

1. Данные инвентаря склоновых процессов. Под инвентарем склоновых процессов следует понимать базу данных, содержащую пространственную информацию о существующих или существовавших склоновых процессах на исследуемой территории. Обычно она представляет собой набор векторных или растровых данных, описывающих площадь и местоположение склоновых процессов.
2. Данные факторов-триггеров. Под факторами-триггерами следует понимать факторы, способствующие активизации склоновых процессов на территории. К таким факторам можно отнести уровень сейсмической активности территории, распределение уровня атмосферных осадков на территории и уровень антропогенного воздействия.
3. Остальные факторы. Данная группа факторов обуславливает формирование или предрасположенность территории к возникновению

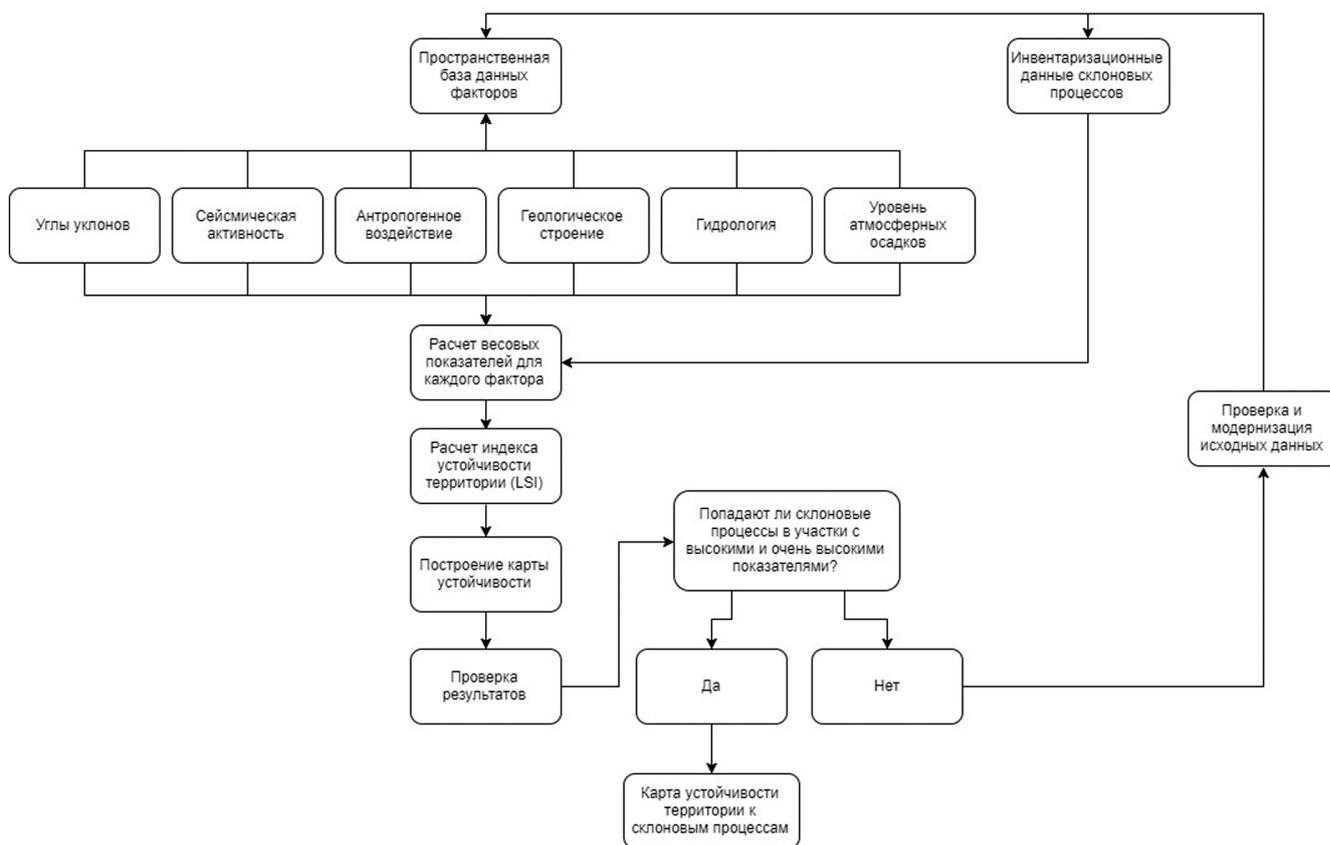


Рис. 1. Схематическое представление анализа устойчивости территории к склоновым процессам

Fig. 1. Schematic visualization of landslide susceptibility analysis process

на ней склоновых процессов. К этим факторам можно отнести данные о геологическом строении территории, ее морфометрических показателях (углах уклона, экспозиции склона, индексах баланса геомасс, мощности потока и топографической влажности и др.), уровне и распределении лесного покрова, гидрологическим особенностям местности и др.

При описании и изучении территории, которая подвержена деятельности склоновых процессов, наиболее важным источником данных является цифровая модель рельефа [7]. Благодаря ей и с помощью различных математических преобразований представляется возможность получить множество характеристик, описывающих факторы, влияющие на склоновые процессы. Наиболее важным из таких факторов является значения углов уклона местности. Также цифровая модель рельефа позволяет получить такие данные, как экспозиция склонов (направленность склона относительно сторон света), кривизна поверхности, индексы влажности и мощности потока и др. [5, 6].

Литологические данные также имеют крайне важное значение, т.к. они влияют на геомеханические характеристики земной поверхности.

Для каждой территории набор факторов, обуславливающих склоновый процесс, может существенно отличаться. Так, в своей работе, направленной на изучение склоновых процессов на территории уезда Индже (Южная Корея) [4], Л. Саро рассматривает такие факторы, как существующие склоновые процессы, углы уклонов местности, экспозицию склонов и их кривизну, топографический индекс влажности, индекс мощности потока, геологические данные местности, различные характеристики лесного покрова (диаметр ствола деревьев, их вид, плотность их расположения на местности, а также их возраст) и характеристики почвенного покрова (дренирование, почвенный материал, толщину почвенного слоя и ее текстуру). Свой выбор он базировал исходя из типа местности, которая является по сути густым лесом, а также небольшой территории.

В свою очередь Б. Вахоно [14], изучая склоновые процессы в районе Вадас Линтанг (Индонезия), использовал такие факторы, как антропогенное воздействие, которое он выражал, через различные типы природопользования, расстояние от линейных элементов, литологические данные, удаленность от водоемов и дорожно-транспортной сети и данные об углах уклона местности.

М. Эрканоглу, изучая устойчивость территории к склоновым процессам в провинции Бартин (Турция), приуроченной к восточному региону Черного моря [2], в качестве факторов использовал углы уклона местности, топографические типы поверхности, экспозицию склонов, топографический индекс влажности, высоту над уровнем моря и индекс NDVI, который можно определить как показатель уровня растительного покрова местности.

Для исследований, проводимых в районе р. Сомеш (Румыния) [1], Ш. Билашко использовал данные о высоте над уровнем моря, показатели углов уклона местности, геологические данные, плотность речной сети, уровень атмосферных осадков, антропогенное воздействие, за которое он принимал типы землепользования и данные о глубине речной сети.

Д. Констанцо в своей работе [9] проводит сравнительный анализ факторов, которые используются для изучения устойчивости территории к склоновым процессам. Так, основываясь на его работе, можно выделить группу основных факторов, которые остаются неизменными, невзирая на различные условия расположения исследуемых территорий. Наиболее значимыми факторами, согласно его исследованию, являются показатели углов уклона местности, геологические данные, сведения о землепользовании, которые выражают антропогенное воздействие и показатель неровности поверхности.

Для сильно урбанизированных территорий имеет важное значение уровень антропогенного воздействия. Зачастую данные о деятельности

человека и его влиянии на склоновые процессы выражается через объекты инфраструктуры, дорожно-транспортную сеть или плотность населения. Среди них наибольшую информацию дают данные дорожно-транспортной сети, которая в целом отражает комбинацию данных инфраструктуры и плотности населения. Количественным показателем, описывающим фактор антропогенного воздействия, в данном случае является близость склонового процесса к дорожно-транспортной сети [6].

Таким образом, среди множества факторов, оказывающих влияние на склоновые процессы, к основным можно отнести особенности рельефа местности и неровностей поверхности Земли, климатические, геологические, гидрологические и антропогенные факторы. Их выбор для применения в региональном анализе устойчивости территории к склоновым процессам в первую очередь должен основываться на характерных условиях региона исследования, учитывая важные исторические аспекты и сложившийся режим функционирования антропо-экосистемы региона (табл. 1).

Пространственный анализ устойчивости к склоновым процессам заключается в том, что при анализе факторов для заданного числа ячеек сетки  $N\{D\}$ , содержащих событие  $D$ , и общего количества ячеек сетки  $N\{T\}$  априорная вероятность выражается по формуле (1):

$$P\{D\} = \frac{N\{D\}}{N\{T\}}. \tag{1}$$

Таблица 1

**Факторы, влияющие на склоновые процессы и их геопространственное представление**

*Factors, that affects landslide process and their spatial interpretation*

Классификация		Тип геопространственных данных
Пространственная база данных	Фактор	
Склоновые процессы	Склоновые процессы	ARC/INFO полигональный слой
Топография	Углы уклонов	GeoTIFF
	Направление склонов	
	Кривизна	
Гидрография	Расстояние от водоемов	GeoTIFF или ARC/INFO линейный слой
Почвенный покров	Типы почв	GeoTIFF
Геология	Литология	GeoTIFF
	Расстояние от линеаментов	
Растительный покров	Растительный покров	GeoTIFF
NDVI	NDVI	GeoTIFF
Климат	Уровень осадков	GeoTIFF
Сейсмичность	Сейсмичность	GeoTIFF

Предположив, что бинарный предиктор влияющего фактора  $B$  занимает  $N\{B\}$  ячеек сетки, и если некоторое количество известных проявлений склонового процесса находится в пределах ячеек данного фактора, т.е.  $N\{D \cap B\}$ , то предпочтительность появления, учитывая возможность наличия фактора-предиктора и отсутствия влияющего фактора, можно выразить формулами (2) и (3):

$$P\{D|B\} = \frac{P\{D \cap B\}}{P\{B\}} = P\{D\} \frac{P\{B|D\}}{P\{B\}}, \quad (2)$$

$$P\{D|\bar{B}\} = \frac{P\{D \cap \bar{B}\}}{P\{\bar{B}\}} = P\{D\} \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}\}}. \quad (3)$$

Постериорная вероятность проявления определяет наличие или отсутствие фактора и обозначается через  $P\{D|B\}$  и  $P\{D|\bar{B}\}$  соответственно.  $P\{D|B\}$  и  $P\{D|\bar{B}\}$  означают постериорные вероятности нахождения ячеек сетки фактора  $B$  в ячейках сетки события  $D$ .

Весовые коэффициенты для бинарных факторов определяются по формулам (4) и (5):

$$W^+ = \log_e \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}}, \quad (4)$$

$$W^- = \log_e \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}}, \quad (5)$$

где  $W^+$  и  $W^-$  – весовые коэффициенты отсутствия или присутствия влияющих на склоновый процесс факторов, соответственно.

При использовании метода весомости признака в ГИС весовые коэффициенты можно рассчитать по формулам (6) и (7):

$$W_i^+ = \log_e \left( \frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \right), \quad (6)$$

$$W_i^- = \log_e \left( \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \right), \quad (7)$$

где  $N_{pix1}$  – присутствие склонового процесса внутри сетки фактора,  $N_{pix2}$  – присутствие склонового процесса вне сетки фактора,  $N_{pix3}$  – отсутствие склонового процесса внутри сетки фактора,  $N_{pix4}$  – отсутствие склонового процесса вне сетки фактора.

Используемые ячейки сетки определяются согласно матрице (табл. 2).

Таблица 2

**Матрица определения используемых ячеек сетки фактора**

*Matrix of factors pixel value evaluation*

Оползень	Фактор	
	Присутствие	Отсутствие
Присутствие	$N_{pix1}$	$N_{pix2}$
Отсутствие	$N_{pix3}$	$N_{pix4}$

Весовые коэффициенты также используются для нахождения показателя контраста ( $C$ ), который определяет меру корреляции между переменной фактора и склоновым процессом, который определяется по формуле (8).

$$C = W^+ - W^-. \quad (8)$$

Конечным результатом анализа с помощью метода весомости признака является расчет показателя индекса устойчивости территории к склоновым процессам  $LSI$ , который определяется по формуле (9).

$$LSI = \exp(\sum W^+ + \ln(O_f)), \quad (9)$$

где  $O_f$  – весовые коэффициенты проявления склонового процесса на исследуемой территории, которые находятся по формуле (10).

$$O_f = \frac{P_f}{(1-P_f)}, \quad P_f = \frac{A_f}{A_t}, \quad (10)$$

где  $A_f$  – часть района исследований, подверженная склоновым процессам,  $A_t$  – общая площадь исследуемой территории.

Проверка результатов анализа устойчивости территории к склоновым процессам проводится с использованием тестовых участков на местности для каждой исследуемой области. Зачастую также проводится проверка двух гипотез – зависимости места протекания склоновых процессов от различной пространственной информации (рельефа, почвенно-растительного покрова, геологии и др.) и ускорения протекания склоновых процессов благодаря воздействию специфических факторов (уровня осадков, сейсмичности и др.) [3, 12].

Проверка результатов модели может проводиться разными способами. Наибольшее распространение получил метод ROC кривой.

Кривая ROC представляет собой графическое отображения взаимосвязи между вероятностью наличия истинно-положительных значений или чувствительности (правильно предсказанного события)

на оси X и ложноположительной вероятностью или специфичностью (неправильно предсказанным событием) по оси Y [11].

Чувствительность – это вероятность правильно определенного склонового процесса в ячейке сетки, которая наносится на ось Y кривой ROC. Специфичность – это вероятностный показатель, того что присутствие склонового процесса в ячейке сетки правильно определено.

Точность анализа устойчивости региона к склоновым процессам определяется площадью под ROC-кривой. Площадь, равная 1, указывает на идеальную работу модели, в то время как площадь, равная 0,5, говорит о том, что созданная модель имеет в значительной степени очень плохие результаты [15].

Чем ближе кривая ROC приближается к левому краю графика и верхней его границе, тем точнее будут результаты анализа. Так как чувствительность стремится к 1, а специфичность стремится к 0, то мерой адекватности модели может служить площадь под кривой ROC.

При оценке модели на адекватность используются итоговые данные устойчивости территории, полученные в результате моделирования, и данные инвентаря склоновых процессов (расположение склоновых процессов в районе исследования).

Обе карты переводятся в текстовый формат для последующего анализа. Мерой чувствительности служат показатели третьего столбца (столбец Z), в котором указаны значения чувствительности территории к склоновым процессам.

Показатель специфичности определяется из данных инвентаря склоновых процессов. Для этого растровые данные переводятся в текстовый бинарный формат, с учетом того, что территории, на которых присутствует склоновые процессы, имеют значения «1», в то время как территории, на которых эти процессы отсутствуют, имеют значение «0».

В своих работах [8, 10, 13, 15] С. ван Вестен предложил использовать альтернативный способ проверки точности – площадь под кривой (Area under curve). Этот показатель определяется по формуле (11):

$$AUC = \sum_{i=0}^n (x_i - x_{i-1}) \times y_i - \left[ \frac{(x_i - x_{i-1})(y_i - y_{i-1})}{2} \right], \quad (11)$$

где  $x_i$  – доля исследуемой территории,  $y_i$  – доля оползневой территории.

Учитывая то, что анализ склоновых процессов может проводиться на достаточно большой территории, существует вероятность столкнуться с рядом технических особенностей, которые

приведут к невозможности проверки модели на адекватность.

К таким особенностям можно отнести необходимость использования высоких вычислительных мощностей, что связано с огромным объемом анализируемых данных.

В данном случае следовало бы использовать случайную выборку итоговых данных (точек), которая будет сравниваться с тестовой выборкой инвентаря склоновых процессов.

Для осуществления такого рода проверки модели на адекватность необходимо использовать две выборки данных – выборку случайных данных по уровню устойчивости и бинарные данные инвентаря склоновых процессов (в зависимости от присутствия или отсутствия склонового процесса в пределах пикселя, его значение приравнивается к 1 или 0 соответственно).

Таким образом, общая точность анализа рассчитывается по формуле (12):

$$A = \frac{S_x}{S_t} \times 100\%, \quad (12)$$

где  $A$  – общая точность анализа,  $S_x$  – количество пикселей со значением высокого и очень высокого уровня оползневой чувствительности,  $S_t$  – общее количество случайных точек в выборке.

Это позволит существенно снизить необходимость использования высокопроизводительных вычислительных средств и не потерять в качестве итоговой проверки результата.

### Заключение

Пространственный региональный анализ устойчивости территории к проявлению склоновых процессов может стать базисом для принятия управленческих решений, помогая населению, планировщикам и инженерам уменьшать последствия, потери и ущерб, вызванные современными или будущими проявлениями склоновых процессов.

Комплексные условия, оказывающие воздействие на склоновые процессы, требует системного подхода для прогнозирования устойчивых и неустойчивых к ним территорий.

Применение геопространственного подхода в данном случае позволит уменьшить финансовые затраты на проведение анализа ситуации со склоновыми процессами в исследуемом регионе, проводимого стандартными полевыми методами и изысканиями, и значительно увеличить пространственный охват территории.

Представленный в данной работе подход позволяет с довольно высокой точностью классифи-

цировать территорию по степени ее устойчивости к склоновым процессам и анализировать существующую ситуацию в регионе или анализировать возможные сценарии для ее развития.

Также данный подход позволяет анализировать и изучать факторы, оказывающие воздействие на склоновые процессы, их вклад (как отдельно, так и комбинированное их воздействие), величину этого вклада, а также дает представление о возможности корректировки уровня воздействия тех или иных факторов для управления самим процессом.

**Ключевые слова:** ГИС, склоновые процессы, устойчивость территории, пространственный анализ, геоинформатика.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bilaşco Ş., Horvath C., Roşian G., Sorin F., Keller I.E. Statistical model using GIS for the assessment of landslide susceptibility. Case-study: The Someş Plateau // Journ. Geog. – 2011. – V. 55, Is. 2. – P. 91-101.
2. Ercanoglu M. Landslide susceptibility assessment of SE Bartin (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2005. – 5. – P. 979-992.
3. Liu S., Wu Y. Landslide Susceptibility Mapping in the Gangu County, China Using Artificial Neural Network and GIS.
4. Saro L., Woo J.S., Kwan-Young O., Mounq-Jin L. The spatial prediction of landslide susceptibility applying artificial neural network and logistic regression models: A case study of Inje, Korea // Open Geosci. – 2016. – 8. – P. 117-132.
5. Кривогуз Д.О. Методика оценки оползневой устойчивости Крыма с помощью ГИС [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации : электрон. журн – 2016. – № 67 (11). – С. 994-997. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/11/72166> (дата обращения: 30.05.2018).
6. Кривогуз Д.О. Влияние оползневых процессов на компоненты окружающей среды [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации : электрон. журн – 2016. – № 10 (66). – С. 718-720. – URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/10/72165> (дата обращения: 29.05.2018).
7. Burrough P.A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. – Oxford : Oxford University Press, 1986. – 193 p.
8. Corominas J. [et al.]. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk // Bull. Eng. Geol. Environ. – 2014. – 73. – P. 209-263.
9. Costanzo D. [et al.]. Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin

(Spain) // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2012. – 12. – P. 327-340.

10. Gaprindashvili G., Van Westen C.J. Generation of a national landslide hazard and risk map for the country of Georgia // Natural Hazards. – 2016. – V. 80, Is. 1. – P. 69-101.

11. Hajian-Tilaki K. Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve Analysis for Medical Diagnostic Test Evaluation // Caspian journal of internal medicine. – 2013. – V. 4, No. 2. – P. 627-635.

12. Lollino G. [et al.]. Engineering geology for society and territory : V. 2: Landslide Processes. – Berlin : Springer, 2015.

13. Pellicani R., Van Westen C.J., Spilotro G. Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information // Landslides : Journal of the International Consortium on Landslides. – 2014. – V. 11, Is. 3. – P. 463-480.

14. Wahono B.F.D. Applications of Statistical and Heuristic Methods for Landslide Susceptibility Assessments: A case study in Wadas Lintang Sub District. – Indonesia : Central Java Province : Wonosobo Regency, 2010. – 106 с.

15. Van Westen C.J., Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2006. – V. 65, Is. 2. – P. 167-184.

16. Van Westen C.J., Rengers N., Soeters R. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment // Natural Hazards. – 2003. – V. 30, Is. 3. – P. 399-419.

### REFERENCES

1. Bilaşco Ş., Horvath C., Roşian G., Sorin F., Keller I.E. Statistical model using GIS for the assessment of landslide susceptibility. Case-study: The Someş Plateau // Journ. Geog. 2011. V. 55, Is. 2. P. 91-101.
2. Ercanoglu M. Landslide susceptibility assessment of SE Bartin (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. 5. P. 979-992.
3. Liu S., Wu Y. Landslide Susceptibility Mapping in the Gangu County, China Using Artificial Neural Network and GIS.
4. Saro L., Woo J.S., Kwan-Young O., Mounq-Jin L. The spatial prediction of landslide susceptibility applying artificial neural network and logistic regression models: A case study of Inje, Korea // Open Geosci. 2016. 8. P. 117-132.
5. Krivoguz D. Metodika ocenki opolznevoj ustojchivosti Kryma s pomoshh'ju GIS // Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. 2016. No. 67 (11). P. 994-997.

- URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/11/72166> (date of access: 30.05.2018).
6. Krivoguz D. Vlijanie opolznevyh processov na komponenty okruzhajushhej sredy // *Sovremennye nauchnye issledovanija i innovacii*. 2016. No. 10 (66). P. 718-720. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/10/72165> (date of access: 29.05.2018).
7. Burrough P.A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. – Oxford : Oxford University Press, 1986. 193 p.
8. Corominas J. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2014. 73. P. 209-263.
9. Costanzo D. et al. Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin (Spain) // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012. 12. P. 327-340.
10. Gaprindashvili G., Van Westen C.J. Generation of a national landslide hazard and risk map for the country of Georgia // *Natural Hazards*. 2016. V. 80, Is. 1. P. 69-101.
11. Hajian-Tilaki K. Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve Analysis for Medical Diagnostic Test Evaluation // *Caspian journal of internal medicine*. 2013. V. 4, No. 2. P. 627-635.
12. Lollino G. et al. Engineering geology for society and territory : V. 2: Landslide Processes. Berlin : Springer, 2015.
13. Pellicani R., Van Westen C.J., Spilotro G. Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information // *Landslides : Journal of the International Consortium on Landslides*. 2014. V. 11, Is. 3. P. 463-480.
14. Wahono B.F.D. Applications of Statistical and Heuristic Methods for Landslide Susceptibility Assessments: A case study in Wadas Lintang Sub District. – Indonesia : Central Java Province : Wonosobo Regency, 2010. 106 c.
15. Van Westen C.J., Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2006. V. 65, Is. 2. P. 167-184.
16. Van Westen C.J., Rengers N., Soeters R. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment // *Natural Hazards*. 2003. V. 30, Is. 3. P. 399-419.