ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ¹

В.В. Симонян, Г.А. Николаева

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337 г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ. Проведен анализ динамики оползневых процессов на примере Карамышевского склона в г. Москва. Показано, что методика корреляционного анализа с использованием случайных функций может быть использована для анализа динамики оползневых процессов наряду с другими методами. Исходным материалом послужили смещения оползневых точек Карамышевского оползня, полученные по данным геодезического мониторинга. По этим смещениям были построены планы изолиний в пространстве. Применяя методику корреляционного анализа и проводя необходимые вычислительные расчеты, получили оценки математического ожидания для случайных величин, оценки дисперсий и корреляционных моментов, а также оценки среднеквадратических отклонений; также получена нормированная автокорреляционная функция, которая аппроксимирована экспоненциальной функцией. Приведены иллюстрации с изолиниями смещений, графиком случайной функции, графиком нормированной автокорреляционной функции и графиком аппроксимирующей функции. Полученная экспоненциальная функция позволяет сделать выводы относительно оползневых процессов на Карамышевском склоне: оползневые смещения продолжаются и будут продолжаться там в будущем. Необходимо предусмотреть мероприятия по инженерной защите склона. Использованный метод можно рекомендовать для анализа динамики оползневых процессов и для других оползневых склонов. Аппроксимация нормированной корреляционной функции зависимостью вида $\rho = 0,9986e^{-3E-04x}$ позволяют применить указанный подход для прогноза смещений оползневых точек.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оползень, склон, случайные величины, случайные функции, циклы наблюдений, оценка математического ожидания, оценка дисперсии, оценка среднеквадратического отклонения, нормированная корреляционная функция, стационарный процесс, прогноз

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Симонян В.В., Николаева Г.А. Исследование оползневого процесса методом корреляционного анализа с использованием случайных функций // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 8 (107). С. 846–853. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.846-853

STUDY OF THE LANDSLIDE PROCESS BY THE CORRELATION ANALYSIS METHOD USING RANDOM FUNCTIONS

V.V. Simonyan, G.A. Nikolaeva

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT. Subject of research is the analysis of the dynamics of landslide processes on the example of Karamyshevskiy slope in Moscow. Objectives are to show that the method of correlation analysis using random functions can be used to analyze the dynamics of landslide processes along with other methods. The magnitude of the displacements of landslide points of Karamyshevskiy landslide, obtained from the data of geodetic monitoring (a total of 8 cycles of observations) serve as source material. Plans of isolines in space were constructed on the basis of these displacements. Applying the method of correlation analysis and having the necessary computational calculations, the estimates of the mathematical expectation for random variables, estimation of variance and correlation moments and estimating the standard deviations obtained normalized autocorrelation function, which is approximated by exponential function, were obtained. For clarity, the illustrations are given with isolines of displacements, the random graph function, the graph of the normalized autocorrelation function and the graph of the approximating function. The obtained exponential function allows to make some conclusions about landslide processes in Keramicheskoy slope: landslide displacement is continuing and will continue in the future. It is necessary to take measures for engineering protection; approximation of the normalized correlation function of the form $\rho = 0.9986e^{-3E-04x}$ allow to apply this approach to expectation values of the displacements of the landslide points. The study of landslide process at Karamyshevskiy slope by the method of correlation analysis using the random functions shows that this method can be used in the analysis of slope stability along with other methods. The method can be recommended for the analysis of the dynamics of landslides and other landslide slopes.

KEY WORDS: landslide, slope, random variables, random functions, cycles of observation, assessment, mathematical expectation, estimation of variance, estimation of standard deviation, normalized correlation function, stationary process, forecast

FOR CITATION: Simonyan V.V., Nikolaeva G.A. Issledovanie opolznevoogo protsessa metodom korrelyatsionnogo analiza s ispol'zovaniem sluchaynykh funktsiy [Study of the Landslide Process by the Correlation Analysis Method Using Random Functions]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 8 (107), pp. 846–853. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.846-853

¹ Хотим выразить благодарность рецензентам, чьи замечания нами учтены.

Изучение деформаций земной поверхности как в пространственном, так и временном измерениях в конкретных региональных условиях является важнейшей комплексной задачей геодезической, геологической, геодинамической, гидрологической практики. Одним из путей к изучению закономерностей оползневых процессов является количественная оценка их динамики и анализ оползневых деформаций геодезических наблюдений. Геодезические наблюдения позволяют получить геометрические параметры смещений на оползневом склоне, без которых невозможен любой анализ смещений оползней.

Исследования по анализу динамики оползневых процессов ведутся как в нашей стране, так и за рубежом [1–21]. Однако они основаны на традиционных методах математической обработки геодезических наблюдений.

В статье [22] очень подробно описана как теория случайных процессов, так и ее инженерные приложения. Эта теория очень хорошо согласуется с задачами, связанными со случайными явлениями, требующими вероятностного подхода. Возможность применения теории случайных функций для анализа оползневых процессов впервые была рассмотрена в статье [15]. По материалам этой работы были выпущена монография [6], в которой дана методика корреляционного анализа с использованием случайных функций для исследования оползневого процесса на примере оползневого склона в Коломенском парке, где в 1978 г. и 2002 г. произошли аварии Чертановских коллекторов. Анализ был выполнен на основе плановых смещений оползневых точек.

Если наблюдения за оползнями ведутся в течение длительного времени, то возникает ситуация, когда случайная величина (смещение оползневой точки) меняется за период наблюдений. В теории вероятностей такие случайные величины называются случайными функциями, а их изучением занимается теория случайных функций.

В зависимости от целей исследования аргументом случайной функции может быть любой параметр. Применительно к оползневым процессам аргументом случайной функции примем номер цикла наблюдений. Если рассматривать смещения нескольких оползневых точек, то можно получить несколько реализаций случайной функции. Для анализа случайных процессов при наблюдении за оползнями характерна дискретная случайная последовательность.

Для определения динамики оползневого процесса на оползневом склоне Карамышевской набережной в городе Москва в 2007 г. была создана геодезическая оползневая сеть, состоящая из 46 точек [12]. Программа геодезического мониторинга состояла в определении горизонтальных и вертикальных подвижек оползневого тела [13]. С

учетом активизации подвижек интервал времени между циклами измерений был установлен в 15 дней. Всего проведено восемь циклов начиная с февраля 2007 г. После соответствующей обработки получены планово-высотные смещения всех точек. По этим данным были посчитаны вектора смещений в пространстве для каждой точки. Экспериментальные данные по циклам наблюдений сведены в табл. 1. Смещения точек рассматриваются как модули смещений.

Построим семь планов с изолиниями, проведенных через 1 мм, выполненных с помощью программы Autodesk AutoCAD Civil 3D 2016. На рис. 1 показан план, построенный по первому циклу.

На планах выбираем линию достаточной длины S , расположенную случайным образом относительно направления смещения оползня [17, 18]. По этой линии отложим равные отрезки (рис. 1).

На концах отрезков, отмеченных на рис. 1 красными крестиками, определим значения смещений и получим множество реализаций случайной последовательности смещений. В табл. 2 приведены значения всех реализаций.

Оценки математического ожидания для случайных величин $X(1), X(2), \dots, X(10)$ находят по формуле

$$M_x(Z) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

В нашем случае десять случайных величин $M(Z) = 124,03; 134,06; 127,66; 120,29; 112,90; 102,53; 106,93; 140,43; 132,54; 90,26$.

На рис. 2 показаны все десять реализаций, представляющих собой случайную функцию.

В табл. 3 приведены оценки для элементов корреляционной матрицы: дисперсий и корреляционных моментов, вычисленных по формуле

$$D_x(Z) = \frac{[(X - m_x)^2]}{n-1}.$$

По главной диагонали в табл. 3 стоят оценки дисперсий 8254,18; 7309,68; 6941,47; 6619,78; 6326,52; 5555,87; 6147,57; 9866,70; 7955,180; 3023,81.

Оценки среднеквадратических отклонений по каждому циклу составляют 90,85; 85,50; 83,32; 81,36; 79,54; 74,54; 78,41; 99,33; 89,19; 54,99, будучи вычислены по формуле

$$\sigma_x(Z) = \sqrt{D_x(Z)}.$$

Разделив значения табл. 3 на соответствующие произведения среднеквадратических отклонений, получим таблицу значений нормированной корреляционной функции (табл. 4).

Выполним анализ данных табл. 4 на возможную стационарность случайной функции $X(Z)$. Поскольку 1) математическое ожидание случайной функции непостоянно; 2) значения дисперсий в зависимости от времени изменяется; 2) вдоль парал-

Табл. 1. Смещения оползневых точек, мм

Номер точки	Циклы наблюдений						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4,5	20,3	34,0	53,4	61,0	74,0	86,4
2	6,8	23,3	32,4	52,5	55,9	73,3	79,1
3	5,5	23,8	32,0	51,5	58,4	78,5	84,4
4	8,4	27,4	43,6	73,2	76,5	92,5	109,8
5	6,1	21,0	24,1	41,2	49,0	68,9	92,3
6	10,2	28,8	33,8	43,8	53,9	77,6	119,4
7	23,2	40,0	52,0	84,5	149,3	189,6	192,9
8	23,4	36,5	50,3	77,2	141,2	184,2	201,0
9	27,2	42,4	53,3	79,1	132,6	165,7	189,1
10	20,2	36,8	52,9	83,0	152,2	188,4	199,4
11	10,2	33,7	52,3	94,9	168,7	203,4	221,5
12	15,2	31,3	45,6	69,7	72,8	84,3	86,7
13	19,2	42,5	62,3	100,3	176,7	214,5	252,7
14	23,5	59,0	84,0	118,1	194,1	230,4	234,7
15	24,3	39,8	55,1	84,2	163,0	204,6	209,7
16	19,3	30,1	47,2	71,3	138,3	181,1	186,2
17	22,9	37,3	59,6	84,7	173,0	211,8	223,3
18	27,8	58,1	88,3	123,6	238,3	279,5	295,8
19	25,5	57,3	85,2	125,6	245,5	288,3	302,6
20	15,7	32,7	39,9	47,1	53,7	70,0	77,4
21	5,0	24,7	43,1	55,1	62,1	79,6	86,7
22	16,4	23,8	50,0	84,0	174,3	215,3	229,9
23	18,6	37,6	53,3	81,5	156,2	199,4	208,8
24	10,7	29,2	46,3	69,3	139,4	180,8	189,0
25	17,8	35,3	60,7	86,7	181,1	228,7	246,0
26	26,2	50,1	82,2	111,7	227,9	273,0	294,6
27	24,7	53,1	81,3	117,5	236,0	279,9	293,9
28	3,0	17,6	21,3	30,3	35,0	43,3	44,7
29	5,1	21,7	35,1	44,1	51,3	69,1	75,1
30	5,4	30,4	36,2	67,6	129,7	159,7	164,7
31	9,7	36,3	45,3	73,8	140,1	167,0	172,1
32	10,8	32,3	45,6	70,4	135,3	160,1	165,9
33	12,4	34,7	57,3	86,9	175,7	209,0	217,1
34	8,8	16,6	20,7	35,5	40,5	57,6	70,0
35	4,3	20,1	30,0	35,7	42,6	52,5	62,8
36	8,4	21,6	29,6	34,0	41,9	51,2	57,0
37	13,4	30,5	41,1	71,2	99,6	114,5	121,8
38	8,0	21,8	36,3	60,6	72,4	83,9	87,1
39	6,4	18,9	32,0	55,9	79,4	88,7	94,8
40	7,9	19,5	33,9	57,8	92,9	105,0	115,0
41	9,3	15,3	16,4	33,1	43,9	53,0	66,3
42	6,7	12,1	14,1	19,2	22,5	24,5	32,5
43	21,9	46,4	71,9	107,3	196,3	238,2	251,0
44	19,0	43,3	67,7	102,9	199,9	237,4	252,9
45	22,9	37,6	59,1	99,6	191,3	231,4	241,6
46	4,2	12,8	21,1	33,5	38,9	39,9	40,9

Рис.1. Изолинии смещений в первом цикле

Табл. 2. Реализации случайной последовательности смещений

Номер цикла	Отрезки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	19,2	23,1	23,5	23,8	24,0	21,2	21,1	25,6	24,8	20,0
2	42,5	58,0	53,1	47,1	41,0	34,0	34,0	49,1	52,0	42,3
3	62,3	82,6	75,2	66,0	56,9	50,5	53,9	76,0	76,8	58,3
4	100,3	117,0	107,8	97,0	86,3	76,7	78,7	107,0	105,5	76,3
5	176,7	192,9	184,5	174,7	164,8	148,4	156,9	210,2	194,6	124,1
6	214,5	229,4	222,5	214,3	206,1	190,9	197,7	250,4	229,9	150,0
7	252,7	235,4	227,0	219,1	211,2	196,0	206,2	264,7	244,2	160,8

Рис. 2. График случайной функции (коричневым цветом (ряд 8) показана функция, построенная по математическим ожиданиям)

лелей главной диагонали значения нормированной корреляционной функции также не всегда одинаковы; то можно констатировать, что случайная функция $X(Z)$ не является стационарной.

Следовательно, заключение в отношении стационарности анализируемой функции следует делать с определенной осторожностью. В то же время следует иметь в виду небольшое число реализаций ($n = 10$), принятых в обработку. Это значит, что в полученных оценках необходимо учитывать некоторый элемент случайности. Но так как отступления от стационарности не носят сколько-нибудь закономерного характера, то их можно считать незначимыми.

Выполним проверку гипотезы однородности полученных оценок по статистическим критериям.

Построим доверительный интервал для математического ожидания случайной величины. В качестве исходного положения примем $\Delta_{\text{пред}} = 3\sigma$, где $\Delta_{\text{пред}}$ — предельное значение ошибки измерения. Имеем

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^n M_x(Z)}{n} = \frac{1191,61}{10} = 119,16 \quad ;$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_x(Z)}{n} = \frac{68000,751}{10} = 6800,08 \quad .$$

По таблицам [20] для $n - 1 = 9$ и $\beta = 0,99$ находим, что $t_{\beta} = 3,25$. Тогда

$$\varepsilon_{\beta} = t_{\beta} \sqrt{\frac{\bar{D}}{n}} = 3,25 \sqrt{\frac{6800,08}{10}} = 84,75 \quad .$$

Доверительный интервал будет

$$I_{\beta} = (\bar{M} - \varepsilon_{\beta} < \bar{M} < \bar{M} + \varepsilon_{\beta}) = \\ = 34,41 < 119,16 < 203,91 \quad .$$

Замечаем, что все значения $M_x(Z)$ находятся в пределах доверительного интервала, а потому гипотезу о стационарности случайной функции по математическим ожиданиям можно принять.

Однородность ряда дисперсий установим по критерию Кочрена, имеющего вид

$$G = \frac{\sigma_{\text{max}}^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_i^2}.$$

Данные подставляем в формулу. Вычисление критерия G дает нам $G = \frac{9866,70}{68000,75} = 0,1451$.

Из таблиц распределения значений G при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $n = 9$ и $k = 7$ находим

$$G_p = 0,3259$$

и

$$G < G_p.$$

Полученный результат указывает на незначимость расхождений между дисперсиями, следовательно, полученная информация однородна.

Табл. 3. Оценки дисперсий и корреляционных моментов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8254,18	7696,42	7510,60	7345,16	7180,52	6729,24	7083,99	8977,99	8064,58	4973,85
	7309,68	7120,11	6940,376	6761,64	6325,22	6655,92	8459,55	7609,99	4693,66
		6941,47	6773,73	6606,82	6182,83	6505,12	8259,07	7423,64	4574,12
			6619,78	6466,45	6054,79	6369,50	8075,74	7251,51	4462,88
				6326,52	5927,19	6234,33	7893,06	7080,11	4352,28
					5555,87	5843,17	7391,28	6627,96	4074,87
						6147,57	7780,28	6977,22	4288,86
							9866,70	8855,90	5445,11
								7955,18	4897,39
									3023,81

Табл. 4. Значения нормированной корреляционной функции

1,000	0,991	0,992	0,994	0,994	0,994	0,994	0,995	0,995	0,996
	1,000	1,000	0,998	0,994	0,993	0,993	0,996	0,998	0,998
		1,000	0,999	0,997	0,996	0,996	0,998	0,999	0,998
			1,000	0,999	0,998	0,998	0,999	0,999	0,998
				1,000	1,000	1,000	0,999	0,998	0,995
					1,000	1,000	0,998	0,997	0,994
						1,000	0,999	0,998	0,995
							1,000	1,000	0,997
								1,000	0,999
									1,000

На основании выполненных проверок можно принять гипотезу о стационарности случайной функции. Отсюда следует, что можно усреднять оценки математических ожиданий, дисперсий и среднеквадратических отклонений:

$$\overline{M}_x(Z) = \frac{m_x(1) + m_x(2) + \dots + m_x(10)}{10} = 119,2 \quad ,$$

$$\overline{D}_x(Z) = \frac{D_x(1) + D_x(2) + \dots + D_x(10)}{10} = 6800,1 \quad ^2,$$

$$\overline{\sigma}_x(Z) = \sqrt{\overline{D}_x(Z)} = 82,5 \text{ мм.}$$

По результатам анализа построим нормированную корреляционную функцию стационарного процесса, которой можно заменить случайную функцию $X(Z)$.

В стационарном процессе корреляционная функция зависит только от параметра τ . При постоянном значении τ нормированная корреляционная функция должна быть постоянной. В табл. 4 постоянному τ соответствует главная диагональ ($\tau = 0$) и параллели этой диагонали ($\tau = 1, \tau = 2, \dots$). Чтобы получить значения функции $\rho_x(\tau)$, усредним оценки нормированной корреляционной функции вдоль этих параллелей главной диагонали:

τ	ρ	τ	ρ
1	1,000	6	0,996
2	0,998	7	0,997
3	0,997	8	0,997
4	0,996	9	0,997
5	0,996	10	0,996

По этим данным построим график нормированной автокорреляционной функции (рис. 3).

По результатам вычислений можно сделать определенные выводы относительно стационарности случайной функции. Математическое ожидание в пределах эксперимента постоянно. Среднеквадратические отклонения нормированной корреляционной функции вдоль параллелей главной диагонали также постоянны

В качестве аппроксимирующей функции выберем экспоненциальную функцию. Эмпирическое уравнение

$$\rho = 0,9986e^{-3E-04x}.$$

В результате проведенного корреляционного анализа оползневых процессов с использованием случайных функций получена нормированная корреляционная функция стационарного процесса, которая аппроксимирована экспоненциальной функцией и построен график. Анализ графика показывает следующее:

- оползень активен, оползневые смещения не затухают. Оползень продолжает смещаться. Необходимо предусмотреть мероприятия по инженерной защите;

- аппроксимация нормированной корреляционной функции зависимостью вида $\rho = 0,9986e^{-3E-04x}$ позволяющая применить указанный подход для прогноза величин смещений оползневых точек.

Таким образом, описанный метод можно рекомендовать как еще один метод, позволяющий анализировать оползневые процессы.

Рис. 3. График нормированной автокорреляционной функции

Рис. 4. График аппроксимирующей функции

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврунев Е.И. Проектирование специальной инженерно-геодезической сети для наблюдения за движением оползня. Новосибирск: НИИГАиК, 1989. 25 с.
2. Генике А.А., Черненко В.Н. Исследование деформационных процессов Загорской ГАЭС спутниковыми методами // Геодезия и картография. 2003. № 2. С. 27–33.
3. Григоренко А.Г. Измерение смещений оползней. М.: Недра, 1988. 144 с.
4. Гулакян К.А., Кюнтцель В.В., Постоев Г.П. Прогнозирование оползневых процессов. М.: Недра, 1988. 143 с.
5. Тер-Степанян Г.И. Геодезические методы изучения динамики оползней. М.: Недра, 1979. 157 с.
6. Симонян В.В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами. 2-е изд. М.: МГСУ, 2015. 176 с.
7. Симонян В.В., Тамразян А.Г., Кочиев А.А. Теоретическое обоснование построения среднеквадратических эллипсоидов смещений оползня // Геодезия и картография. 2015. № 12. С. 10–15.
8. Симонян В.В., Тамразян А.Г. К разработке модели оползневого процесса с целью оценки его последствий для зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 4. С. 53–56.
9. Симонян В.В., Тамразян А.Г. Вероятностный анализ потенциальных возможностей оползневых смещений // Безопасность жизнедеятельности. 2017. № 2 (194). С. 28–32.
10. Симонян В.В., Тамразян А.Г. Комплексный анализ устойчивости склона методами инженерной геодезии и механики грунтов // Новые информационные технологии в науке: сб. ст. Международ. науч.-практ. конф. 28 ноября 2016 г., г. Уфа: В 4 ч. Ч. 2. Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2016. С. 162–169.
11. Симонян В.В., Кочиев А.А. О методике расчета силы и ускорения оползня // Науки о Земле. 2016. № 1. Стр. 49–55.
12. Кузнецов А.И. Разработка метода определения поверхности скольжения оползня по данным геодезического мониторинга : дис. ... канд. техн. наук. М.: 2012. 184 с.
13. Об организации мониторинга геоэкологических процессов в городе Москве : Постановление Правительства Москвы от 7 декабря 2004 г. № 868-ПП (в ред. постановления Правительства Москвы от 23.10.2007 № 925-ПП).
14. Симонян В.В. Результаты исследований по определению оползневых смещений с использованием теории случайных функций // Совершенствование системы образования в области землеустройства и кадастров : мат. науч.-практ. конф. (ГУЗ, 29 ноября 2007 года). ГУЗ. М., 2007. С. 188–192.
15. Симонян В.В. Обоснование точности и разработка методов математико-статистического анализа геодезических наблюдений за смещениями оползней : дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 182 с.
16. Симонян В.В., Калинина М.Н. Применение случайных функций для анализа оползневых процессов // Вестник МГСУ. 2011. № 1. С. 233–239.
17. Adler R., Forrai J., Metzger Y. The evolution of geodetic-geodynamic control network in Izrael // Izrael Journal of Earth Sciences. 2001. 50: 1–7.
18. Zaruba Q., Mencl V. Landslides and their control. Praha, 1982. 324 p.
19. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes // Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences. 1996. Vol. 247. Pp. 36–75.
20. Schuster R., Highland L. Overview of the effects of mass wasting on the natural environment // Environmental & Engineering Geoscience. 2007. № 1 (13). Pp. 25–44.
21. J. Corominas, C. van Westen, P. Frattini, et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. May 2014/ Vol. 73. Issue 2. Pp. 209–263.
22. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. 2-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2000. 480 с.

Поступила в редакцию в январе 2017 г.

Принята в доработанном виде в июле 2017 г.

Одобрена для публикации в августе 2017 г.

Об авторах: **Симонян Владимир Викторович** — кандидат технических наук, доцент, Институт гидро-технического и энергетического строительства, **Национальный исследовательский московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; simonyan.vladimir55@gmail.com;

Николаева Галина Александровна — студентка, Институт инженерно-экологического строительства и механизации, **Национальный исследовательский московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; galina-nikolaeva-97@mail.ru.

REFERENCES

1. Avrunnev E.I. *Proektirovanie spetsial'noy inzhenerno-geodezicheskoy seti dlya nablyudeniya za dvizheniem opolznya* [Design of a Special Engineering and Geodetic Network for Monitoring the Landslide Movement]. Novosibirsk: Novosibirsk Institute of Geodesy, Aerial Survey and Cartography, 1989. 25 p. (In Russian)
2. Genike A.A., Chernenko V.N. Issledovanie deformatsionnykh protsessov Zagorskoй GAES sputnikovymi metodami [Investigation of Deformation Processes of the Zagorsk HNPP by Satellite Methods]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography]. 2003, no. 2, pp. 27–33. (In Russian)
3. Grigorenko A.G. *Izmerenie smeshcheniy opolzney* [Measurement of the Landslides Displacements]. Moscow : Nedra Publ., 1988. 144 p. (In Russian)

4. Gulakyan K.A., Kyunttsel' V.V., Postoev G.P. *Prognozirovanie opolznevykh protsessov* [Forecasting Landslide Processes]. Moscow : Nedra Publ., 1988. 143 p. (In Russian)
5. Ter-Stepanyan G.I. *Geodezicheskie metody izucheniya dinamiki opolzney* [Geodetic Methods for Studying the Landslides Dynamics]. Moscow: Nedra Publ., 1979. 157 p. (In Russian)
6. Simonyan V.V. *Izuchenie opolznevykh protsessov geodezicheskimi metodami* [Study of Landslide Processes by Geodetic Methods]. 2-e izd. M.: Moscow State University of Civil Engineering, 2015. 176 p. (In Russian)
7. Simonyan V.V., Tamrazyan A.G., Kochiev A.A. Teoreticheskoe obosnovanie po-stroeniya srednekvadraticsikh ellipsoidov smeshcheniy opolznya [Theoretical Justification of the Construction of Root-Mean-Square Ellipsoids of Landslide Displacement]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography]. 2015, no. 12. pp. 10–15. (In Russian)
8. Simonyan V.V., Tamrazyan A.G. K razrabotke modeli opolznego protsessa s tsel'yu otsenki ego posledstviy dlya zdaniy i sooruzheniy [Revising the Development of the Landslide Process Model With the Purpose of Assessing Its Consequences for Buildings and Structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2015, no. 4, pp. 53–56. (In Russian)
9. Simonyan V.V., Tamrazyan A.G. Veroyatnostnyy analiz potentsial'nykh vozmozhnostey opolznevykh smeshcheniy [Probabilistic Analysis of Potentialities of Landslide Displacements]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety]. 2017, no. 2(194), pp. 28–32. (In Russian)
10. Simonyan V.V., Tamrazyan A.G. Kompleksnyy analiz ustoychivosti sklona metodami inzhenernoy geodezii i mekhaniki gruntov [Complex Analysis of Slope Stability by Methods of Engineering Geodesy and Soil Mechanics]. *Novye informatsionnye tekhnologii v nauke: sb. st. Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf. 28 noyabrya 2016 g. g. Ufa* [New Information Technologies in Science: collected works of the International scientific and practical conference November 28, 2016, Ufa]: 4 parts: part 2. Ufa: MTsII OMEGA SAYNS Publ., 2016. Pp. 162–169. (In Russian)
11. Simonyan V.V., Kochiev A.A. O metodike rascheta sily i uskoreniya opolznya [On the Technique of Calculating the Landslide Force and Acceleration]. *Nauki o Zemle* [Geo-Science]. 2016, no. 1, pp. 49–55. (In Russian)
12. Kuznetsov A.I. *Razrabotka metoda opredeleniya poverkhnosti skol'zheniya opolznya po dannym geodezicheskogo monitoringa : dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of the Method for Determining the Landslide Sliding Surface According to the Geodetic Monitoring Data: Thesis of Candidate of Technical Sciences]. Moscow : 2012. 184 p. (In Russian)
13. *Ob organizatsii monitoringa geoekologicheskikh protsessov v gorode Moskve : Postanovlenie Pravitel'stva Moskvy ot 7 dekabrya 2004 g. no. 868-PP (v red. postanovleniya Pravitel'stva Moskvy ot 23.10.2007 no. 925-PP)* [On the Organization of Monitoring of Geo-Ecological Processes in the City of Moscow: Decree of the Government of Moscow of December 7, 2004 No. 868-PP (as amended by the Resolution of the Government of Moscow No. 925-PP dated October 23, 2007).]. (In Russian)
14. Simonyan V.V. Rezul'taty issledovaniy po opredeleniyu opolznevykh sme-shcheniy s ispol'zovaniem teorii sluchaynykh funktsiy [Results of Studies on the Determination of Landslide Displacement Using the Random Functions Theory]. *Sovershenstvovanie sistemy obrazovaniya v oblasti zemleustroystva i kadastr : mat. nauch.-prakt. konf. (GUZ, 29 noyabrya 2007 goda). GUZ* [Perfection of the System of Education in the Field of Land Management and Cadasters: Scientific-practical Conference (State University of Farming, November 29, 2007). State University of Farming]. Moscow, 2007. Pp. 188–192. (In Russian)
15. Simonyan V.V. *Obosnovanie tochnosti i razrabotka metodov matematiko-statisticheskogo analiza geodezicheskikh nablyudeniy za smeshcheniyami opolzney : dis. ... kand. tekhn. nauk* [Substantiation of the Accuracy and Development of Methods of Mathematical and Statistical Analysis of Geodetic Observations of Landslide Displacement: Thesis of Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 2008. 182 p. (In Russian)
16. Simonyan V.V., Kalinina M.N. Primenenie sluchaynykh funktsiy dlya anali-za opolznevykh protsessov [Application of Random Functions for the Landslide Processes Analysis]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 1, pp. 233–239. (In Russian)
17. Adler R., Forrai J., Metzger Y. the Evolution of Geodetic-Geodynamic Control Network in Izrael. *Izrael Journal of Earth Sciences*. 2001, 50, pp. 1-7.
18. Zaruba Q., Mencl V. *Landslides and Their Control*. Praha, 1982. 324 p.
19. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide Types and Processes. *Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences*. 1996, vol. 247, pp. 36–75.
20. Schuster R., Highland L. Overview of the Effects of Mass Wasting on the Natural Environment. *Environmental & Engineering Geoscience*. 2007, no. 1 (13), pp. 25–44.
21. J. Corominas, C. van Westen, P. Frattini, et al. Recommendations for the Quantitative Analysis of Landslide Risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. May 2014/ Vol. 73. Issue 2. Pp. 209–263.
22. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of Probability and Its Engineering Applications]. 2nd edition, stereotype. Moscow : Vysshaya shkola Publ., 2000. 480 p. (In Russian)

Received in January 2017.

Adopted in revised form in July 2017.

Approved for publication in August 2017

About the authors: **Simonyan Vladimir Victorovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Environmental Engineering and Mechanization, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; simonyan.vladimir55@gmail.com;

Nikolaeva Galina Alexandrovna — student, Institute of Environmental Engineering and Mechanization, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; galina-nikolaeva-97@mail.ru.