

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 551.435.627:517

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-242-261

Математический анализ влияния влажности грунтового массива на динамику изменений горизонтальных перемещений гребня оползня

Георгий Владимирович Дегтярев¹, Дарья Валерьевна Лейер²,
Ольга Георгиевна Дегтярева³

^{1, 2, 3}Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
Краснодар, Российская Федерация

¹degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1451-4489>

²dasha_leyer@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9893-030X>

³degtyareva.o.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>

Аннотация. Цель: выявить динамику изменения горизонтальных перемещений гребня оползня при изменении влажности грунтового массива горной и предгорной местности. **Материалы и методы.** В исследовании разработана расчетная математическая модель оползневого массива, реализованная с использованием конечно-элементного программного комплекса Midas GTX NX. Для математического анализа полученных результатов зависимостей, а также для выявления функций изменения состояния склона использована программа wxMaxima. Получены функции отклика по математической модели перемещений горизонтальных S_x (мм), по длине гребня оползня L (м), при переменной влажности массива W (%). **Результаты.** Анализ математической модели и функции отклика при наибольшей постоянной длине гребня оползня L (м), $F_3(10,64; y)$ и при наименьшей влажности массива $W = 10$ % позволяет фиксировать положительное значение перемещения горизонтального $S_x = 0,0157$ мм. При дальнейшем увеличении влажности массива W перемещение горизонтальное S_x будет убывать и вначале достигнет нулевого значения $S_x = 0,0$ мм, при влажности $W = 11,23$ %, а затем устремится к экстремуму по отрицательному максимуму, равному $S_x = -0,042$ мм, которого достигнет при влажности $W = 19,18$ %. Дальнейшее увеличение влажности опять обеспечит устойчивое стремление функции к нулевому значению $S_x = 0,0$ мм, которое наступит при влажности $W = 26,82$ %, а затем перемещение устремится к положительным значениям и при наибольшей влажности 36 % достигнет положительного значения для данного сечения, равного $S_x = +0,159$ мм. **Выводы.** Согласно проведенным исследованиям, выявлено, что при изменении влажности грунта с 10 до 18 % горизонтальные перемещения практически остаются неизменными. Однако при изменении влажности до 36 % горизонтальные перемещения увеличиваются в 4 раза, что может привести к активизации оползневых процессов.

Ключевые слова: грунтовый массив, оползень, влажность грунта, математическая модель, метод конечных элементов, численный расчет, функции отклика и анализ

Финансирование: работа финансировалась в рамках Государственного задания по теме: «Разработка эффективных архитектурных, конструктивных и технологических решений по предупреждению и ликвидации чрезвычайных и аварийных ситуаций природного и техногенного характера в проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации зданий, сооружений», регистрационный номер: 121032300040-4.

Для цитирования: Дегтярев Г. В., Лейер Д. В., Дегтярева О. Г. Математический анализ влияния влажности грунтового массива на динамику изменений горизонтальных

перемещений гребня оползня // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 242–261.
<https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-242-261>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Mathematical analysis of the influence of soil mass moisture on the dynamics of changes in horizontal landslide crest displacements

Georgy V. Degtyarev¹, Darya V. Leyer², Olga G. Degtyareva³

^{1, 2, 3}Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

¹degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1451-4489>

²dasha_leyer@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9893-030X>

³degtyareva.o.g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>

Abstract. Purpose: to identify the dynamics of changes in horizontal landslide crest displacements with changing soil moisture content in mountainous and foothill areas. **Materials and methods.** A simulation landslide model was developed using the Midas GTX NX finite element software package. wxMaxima program was used for the mathematical analysis of the obtained dependencies and for identifying slope state change functions. Response functions were obtained for the mathematical model of horizontal displacements S_x (mm), along the landslide crest length L (m), with varying soil moisture content W (%). **Results.** The analysis of the mathematical model and the response function for the largest constant landslide crest length L (m), $F_3(10.64; y)$ and the lowest massif moisture content $W = 10\%$ allows recording a positive value of horizontal displacement $S_x = 0.0157$ mm. With a further increase in the soil mass moisture content W , the horizontal displacement S_x will decrease and initially reach a zero value $S_x = 0.0$ mm at a moisture content $W = 11.23\%$, and then tend to an extremum along the negative maximum equal to $S_x = -0.042$ mm, which it will reach at a moisture content $W = 19.18\%$. A further increase in soil moisture will again ensure a stable approach of the function to zero, $S_x = 0.0$ mm, which occurs at a moisture content of $W = 26.82\%$. The displacement will then tend toward positive values and, at the highest moisture content of 36% , will reach a positive value for this section, equal to $S_x = +0.159$ mm. **Conclusions.** According to the conducted research, it was found that when soil moisture content changes from 10 to 18% , horizontal displacements remain virtually unchanged. However, when soil moisture content changes to 36% , horizontal displacements increase fourfold, which can lead to the activation of landslide processes.

Keywords: soil mass, landslide, soil moisture, mathematical model, finite element method, numerical calculation, response functions and analysis

Funding: The work was funded within the framework of the State Assignment on the theme: “Development of effective architectural, structural and technological solutions for the prevention and elimination of accidents and emergencies of natural and man-made nature in the design, construction, reconstruction and operation of buildings and structures”, registration number is: 121032300040-4.

For citation: Degtyarev G. V., Leyer D. V., Degtyareva O. G. Mathematical analysis of the influence of soil mass moisture on the dynamics of changes in horizontal landslide crest displacements. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(3):242–261. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-242-261>.

Введение. Литологическое строение территории Черноморского побережья России характеризуется горным рельефом с обширным распро-

странением различных геологических процессов. Одним из самых распространенных склоновых процессов являются оползни. Оползневые процессы пагубно влияют на агроландшафт и садоводческие территории, располагающиеся на склонах. Значительное антропогенное влияние на склоны связано не только с застройкой новых территорий [1, 2], но и с сельскохозяйственной и садоводческой деятельностью, в частности, с распространением садов и виноградников, которые все больше захватывают горно-предгорные ландшафты в ЮФО. Анализ нормативной и научной литературы показал [3–5], что основным фактором, влияющим на устойчивость оползневого склона, является освоение территорий и, как результат, изменение свойств грунтового массива (изменение характеристик грунтов при увлажнении, повышение уровня грунтовых вод и т. д.). Сегодня нет достаточной оценки степени влияния влажности на горизонтальные перемещения гребня оползня [6]. В работе на основе данных реального объекта в г. Севастополе разработана расчетная математическая модель оползневого массива, реализованная с использованием конечно-элементного программного комплекса Midas GTX NX (апробирован в ряде ответственных объектов и исследований) [7–10], а также рассчитаны горизонтальные перемещения гребня оползня. Выполнен математический анализ зависимостей с использованием программы wxMaxima. Получены функции отклика по математической модели перемещений горизонтальных S_x (мм), по длине гребня оползня L (м) при переменной влажности массива W (%). Полученные результаты исследований позволяют однозначно оценить степень влияния каждого из принятых к исследованию факторов на перемещение гребня оползня.

В районе г. Севастополь при развитии сельскохозяйственных и садоводческих предприятий, в частности, распространении виноградников (рисунок 1) выявлен риск оползания грунтов садоводческих и лесных территорий. Активизация оползневых процессов может привести как к нарушению территориальной целостности агроландшафта, так и к ограничению

движения вдоль автомобильной дороги. В геоморфологическом отношении территория исследований расположена в пределах слабонаклонной поверхности выравнивания эоценового возраста. На территории исследований растительность приурочена к урбанизированным ценозам из-за широкой освоенности площадки исследования хозяйственной деятельностью человека.



Рисунок 1 – Антропогенное воздействие на агроландшафт, Крым (фото из интернета: <https://agbz.ru/upload/iblock/58b/main.jpg>)
Figure 1 – Anthropogenic impact on the agricultural landscape, Crimea (photo from the internet: <https://agbz.ru/upload/iblock/58b/main.jpg>)

При анализе устойчивости склона или разработке инженерной защиты территорий влияние на получаемые результаты оказывает множество факторов [11–13]. Однако при исследовании серии реальных оползневых участков выявлено, что одним из основных факторов является переувлажнение грунта. Ярким примером служит мониторинг развития оползневых процессов после ливневых явлений на Черноморском побережье, в частности, в районе Большого Сочи [14]. Численное моделирование оползней и противооползневых сооружений является актуальной задачей, так как позволяет усовершенствовать новые подходы к проектированию и строительству сооружений инженерной защиты [15–17].

С физической точки зрения развитие оползневого процесса можно кратко представить следующим образом: при изменении влажностных показателей грунта происходит снижение прочностных показателей грунта, слагающего склон. Все это увеличивает по поверхности скольжения оползня суммарные сдвигающие силы и снижает удерживающие силы, однако степень влияния каждого фактора и их взаимовлияние на процесс, в том числе в сочетании, до настоящего времени исследованы недостаточно.

Материалы и методы. В работе на основе инженерно-геологических изысканий реального объекта в районе г. Севастополя разработана расчетная математическая модель оползневого массива [18], реализованная с использованием конечно-элементного программного комплекса Midas GTX NX. Численное моделирование позволяет получить функции зависимостей факторов, влияющих на состояние оползневого и переувлажненного массива [19]. Полученные данные применяются в оценке оползневого риска для прогнозирования изменения состояния склона [20]. Для исследования влияния выбранных факторов на состояние склона рассмотрена формализованная модель, представленная на рисунке 2 в виде расчетной схемы, где приведены геометрические исходные данные:

- длина гребня оползня $L = 10,64$ м;
- длина горизонтальной проекции склона $L_x = 10$ м;
- угол наклона склона $\alpha = 20^\circ$.

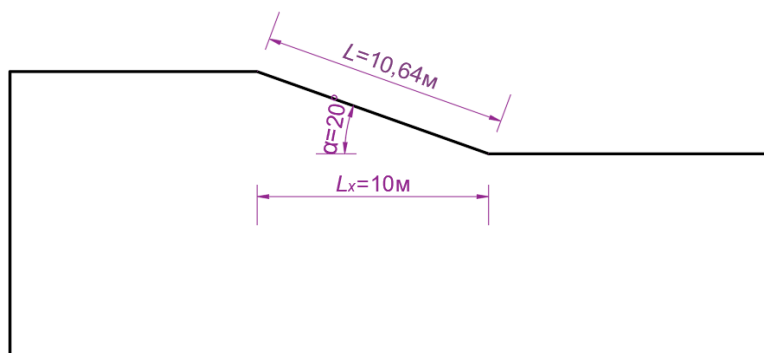


Рисунок 2 – Расчетная схема склона
Figure 2 – Slope calculation scheme

Одним из основных изменяемых факторов (кроме геометрических параметров) является изменение влажности грунта W от 10 до 36 %. Влажность грунта принята по данным анализа инженерно-геологических изысканий оползневых территорий, сложенных глинистыми грунтами на Черноморском побережье.

При этом за исследуемую функцию математического отклика S_x принято горизонтальное перемещение поверхности скольжения оползня. Численный анализ расчетной модели выполнен с использованием геотехнического программного комплекса, основанного на методе конечных элементов, Midas GTX NX [20]. Конечно-элементная модель грунтового массива представлена на рисунке 3.

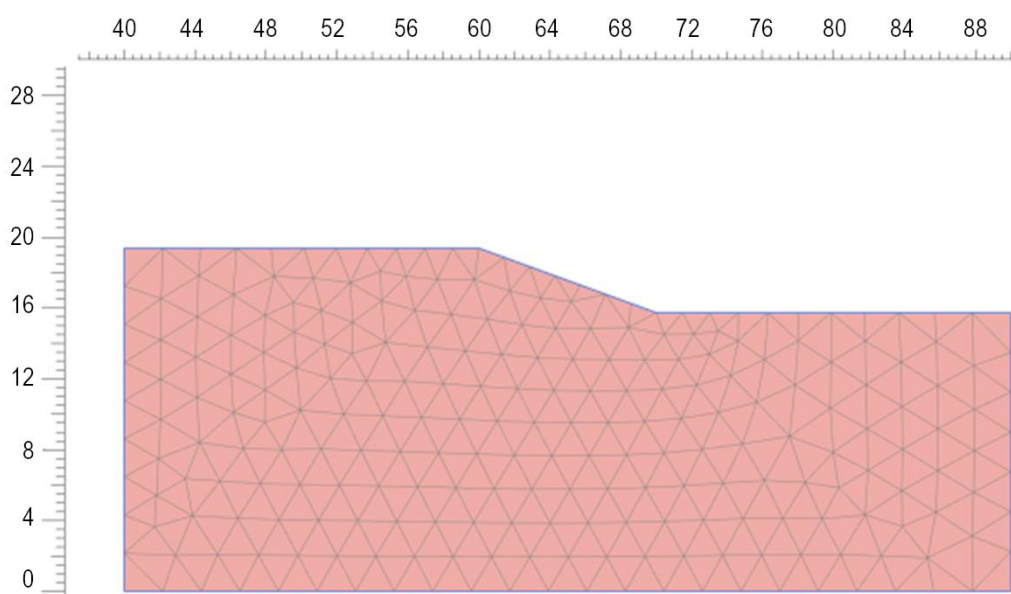


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель грунтового массива
Figure 3 – Finite element model of soil mass

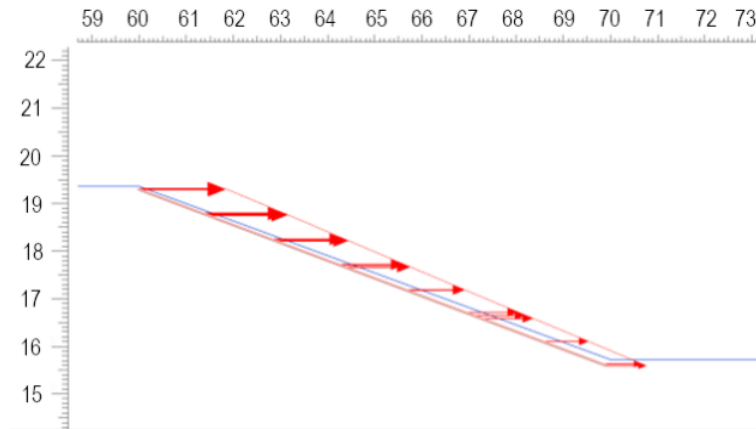
Результаты и обсуждение. Графоаналитическая интерпретация горизонтальных перемещений по гребню оползня, выполненная на основе эпюр перемещений, представленных на рисунке 4, позволяет в первом приближении осуществить визуализированный анализ. При этом визуализация численного эксперимента, представленная на рисунке 5, позволила отметить, что зона развития поверхности скольжения на склоне при изме-

нении влажности имеет явно выраженные особенности, заключающиеся в том, что объем оползневого массива при изменении влажности грунта увеличивается до достижения влажности, равной 30 %, далее происходит уменьшение объема оползневого массива в результате уплотнения нижележащих слоев массой грунта. При дальнейшем изменении влажности глубина поверхности скольжения снижается, что объясняет развитие оползней-потоков при ливневых залповых дождях [21]. На рисунке 5 оттенками синего цвета обозначены области несмещаемых пород (устойчивых), от желтого до красного обозначены зоны прогнозных поверхностей скольжения, причем красным цветом обозначается наиболее вероятная и наиболее опасная поверхность скольжения с наименьшим коэффициентом устойчивости.

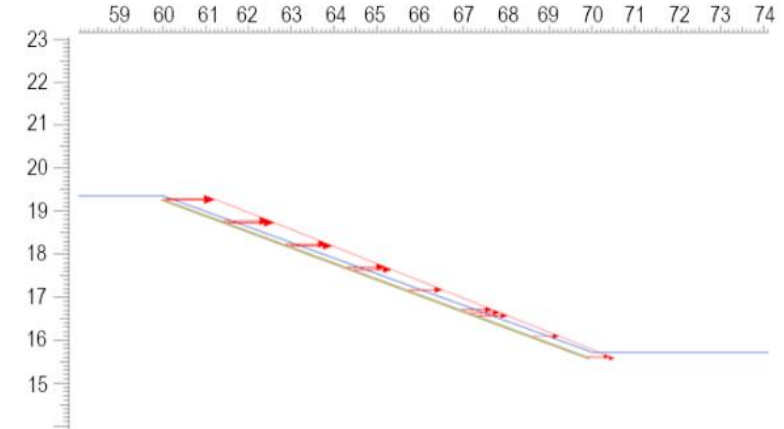
Представленные данные однозначно требуют более углубленного анализа. Для этого на основе проведенного в рамках представленных факторов численного эксперимента получен цифровой массив, оформленный в виде расчетной матрицы, фрагмент которой имеет следующий вид: M:matrix ([0,0000; 10,00; 0,00093]; [1,2811; 10,00; 0,00087]; [1,5958; 10,00; 0,00085]; [2,8787; 10,00; 0,00078]; [3,1866; 10,00; 0,00077]; [4,4292; 10,00; 0,00070]; [4,8397; 10,00; 0,00068]; [5,9704; 10,00; 0,00063]; [7,0914; 10,00; 0,00057]; [7,5126; 10,00; 0,00056]; [7,9260; 10,00; 0,00054]; [9,1260; 10,00; 0,00048]; [9,1260; 10,00; 0,00048] [10,3177; 10,00; 0,00043]...).

На основе экспериментальных данных при использовании программы wxMaxima была получена математическая модель процесса перемещений горизонтальных S_x (мм) – $Z(x; y)$ по длине гребня оползня L (м) – x , при переменной влажности массива W (%) – y , имеющая следующий вид в общепринятых математических символах (1):

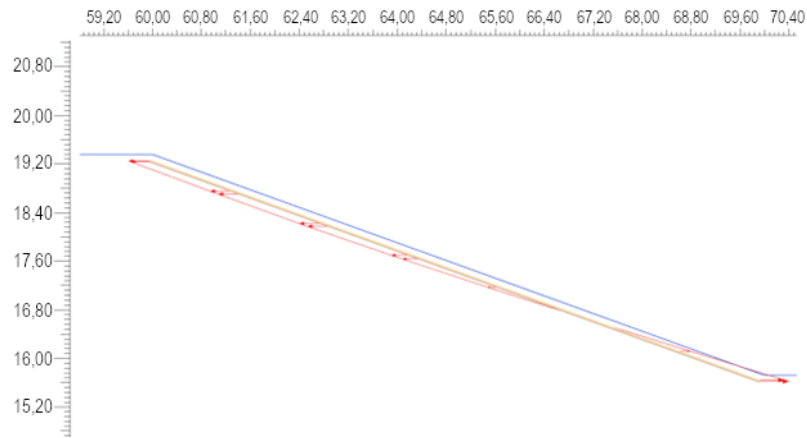
$$Z(x; y) = 0,20534 + 0,00247 \cdot x - 0,02636 \cdot y - 2,73701 \cdot 10^{-5} \cdot xy - 1,69972 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 6,98254 \cdot 10^{-4} \cdot y^2. \quad (1)$$



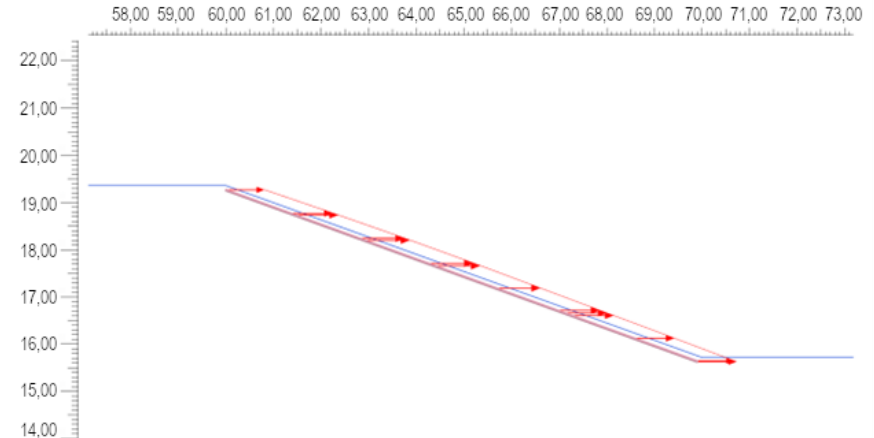
a)



b)



c)



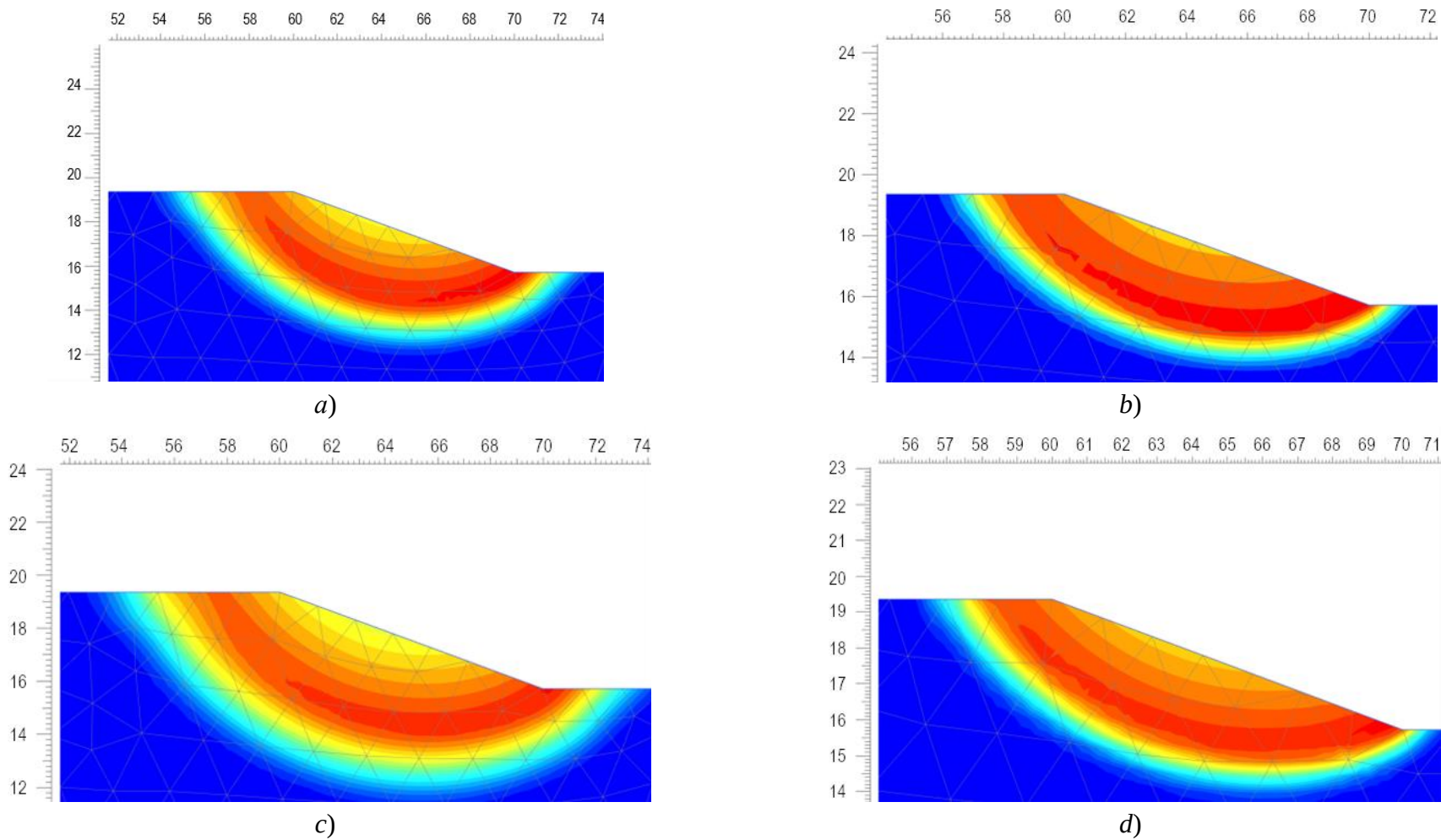
d)

a – влажность 10 %; *b* – влажность 18 %; *c* – влажность 30 %; *d* – влажность 36 %

a – 10 % moisture content; *b* – 18 % moisture content; *c* – 30 % moisture content; *d* – 36 % moisture content

Рисунок 4 – Эпюры горизонтальных перемещений при изменении влажности грунта

Figure 4 – Horizontal displacement diagram with changing soil moisture content



a – влажность 10 %; *b* – влажность 18 %; *c* – влажность 30 %; *d* – влажность 36 %

a – 10 % moisture content; *b* – 18 % moisture content; *c* – 30 % moisture content; *d* – 36 % moisture content

Рисунок 5 – Изменение прогнозной поверхности скольжения при изменении влажности грунта

Figure 5 – Change in the predicted sliding surface with changes in soil moisture

Исследование математической модели перемещений горизонтальных S_x (мм), по длине гребня оползня L (м), при переменной влажности массива W (%) наиболее эффективно реализуется посредством построения линий равных уровней по функции отклика. Реализация поставленной задачи позволила получить линии равных уровней по поверхности функции отклика, приведенные на рисунке 6, где получен уточненный диапазон перемещений горизонтальных S_x (мм), то есть функции отклика, от $-0,04$ до $+0,14$ мм. В свою очередь характер распределения гребней на графике, приводящий к практическому разделению на положительные и отрицательные перемещения горизонтальные S_x (мм) грунтового массива, обязывает при исследовании данного вопроса акцентировать на нем внимание.

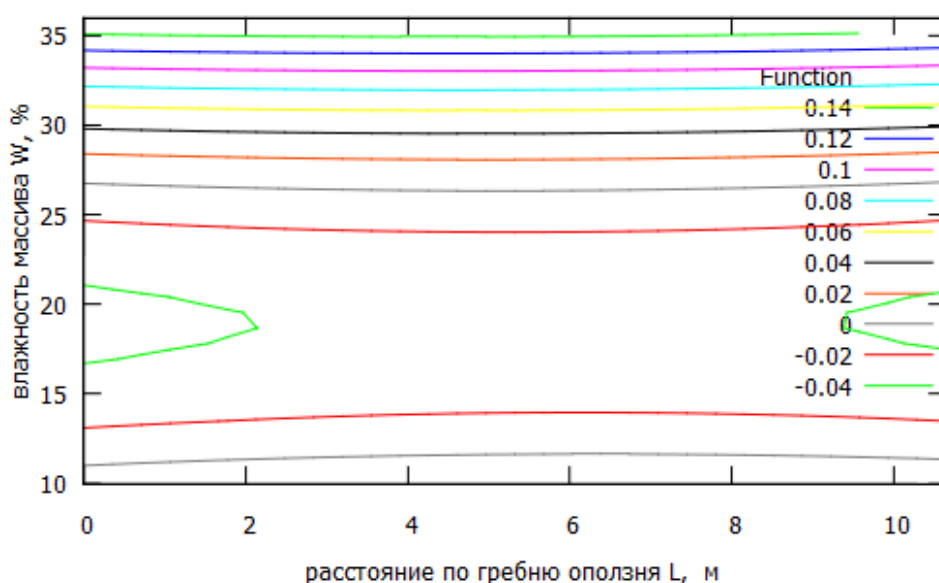


Рисунок 6 – Линии равных уровней по поверхности функции отклика, по математической модели перемещений горизонтальных S_x (мм), по длине гребня оползня L (м), при переменной влажности массива (%)

Figure 6 – Isolevel lines along the surface of the response function, according to the mathematical model of horizontal displacements S_x (mm), along the length of the landslide crest L (m), with variable soil mass moisture content (%)

В продолжении исследования грунтового оползневого массива осуществим анализ функции отклика по математической модели перемещений горизонтальных S_x (мм), по длине гребня оползня L (м), при постоянной влаж-

ности массива W (%). Учитывая ранее отмеченные аспекты, назначим ниже-
следующие постоянные уровни постоянной влажности массива: $F_1(x; 10)$;
 $F_2(x; 11)$; $F_3(x; 16,5)$; $F_4(x; 23)$, $F_5(x; 29,5)$; $F_6(x; 36)$, что позволило получить, из
основной математической модели следующие упрощенные уравнения:

$$F_1(x; 10) = -1,69972 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,0022 \cdot x + 0,01156, \quad (2)$$

$$F_2(x; 11) = -1,69972 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,00217 \cdot x - 1,31266 \cdot 10^{-4}, \quad (3)$$

$$F_3(x; 16,5) = -1,69972 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,002018 \cdot x - 0,0395, \quad (4)$$

$$F_4(x; 23) = -1,69972 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,00184 \cdot x - 0,03156, \quad (5)$$

$$F_5(x; 29,5) = -1,69972 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,00166 \cdot x + 0,03538, \quad (6)$$

$$F_6(x; 36) = -1,69972 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 0,00148 \cdot x + 0,16132. \quad (7)$$

Графическая интерпретация уравнений представлена на рисунке 7.

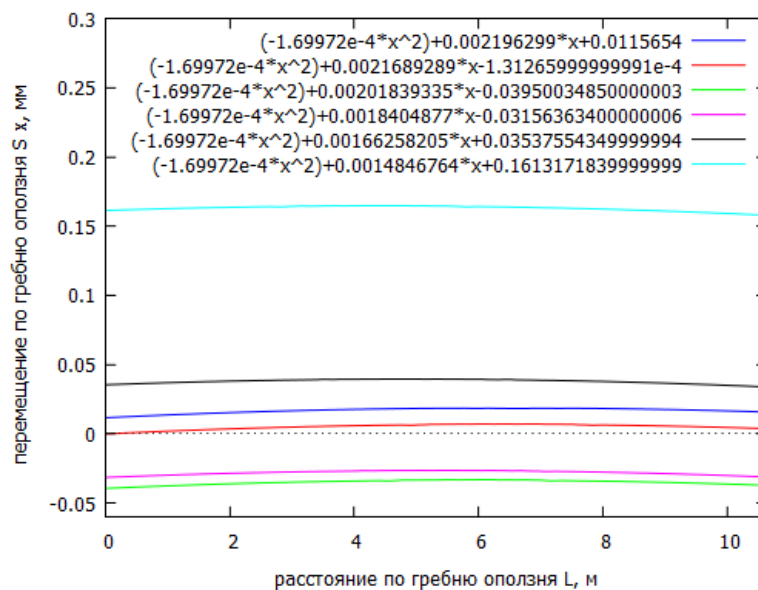


Рисунок 7 – Значения перемещений горизонтальных S_x (мм), по длине гребня оползня L (м), при постоянной влажности массива W (%), $F_1(x; 10)$; $F_2(x; 11)$; $F_3(x; 16,5)$; $F_4(x; 23)$; $F_5(x; 29,5)$; $F_6(x; 36)$

Figure 7 – Horizontal displacement values S_x (mm), along the landslide crest length L (m), at constant soil mass moisture content W (%), $F_1(x; 10)$; $F_2(x; 11)$; $F_3(x; 16,5)$; $F_4(x; 23)$; $F_5(x; 29,5)$; $F_6(x; 36)$

Анализ математических моделей и функций отклика по математической модели горизонтальных перемещений S_x (мм), по длине гребня оползня L (м), при постоянной влажности массива W (%): $F_1(x; 10)$; $F_2(x; 11)$;

$F_3(x; 16,5)$; $F_4(x; 23)$; $F_5(x; 29,5)$; $F_6(x; 36)$ прежде всего позволил зафиксировать присутствие экстремальных значений функций для любых значений постоянной влажности массива во всем диапазоне изменения расстояний по гребню оползня.

В свою очередь графическая интерпретация упрощенных уравнений, полученных на основе математической модели, практически выродилась в линейные зависимости, вне зависимости от изменения расстояния по гребню оползня L (м), и именно это позволяет утверждать, что перемещения горизонтальные S_x (мм) в оползне формируются подавляющим образом влажностью массива W (%). При наименьшей постоянной влажности массива $F(x; 10)$ зафиксировано, при наименьшем расстоянии по гребню оползня L (м), равном $L = 0,0$ м, положительное значение перемещения горизонтального $S_x = 0,012$ мм. При стремлении расстояния по длине гребня оползня L (м) к наибольшему значению $L_{\max} = 10,64$ м, перемещение горизонтальное S_x будет вначале стремиться к экстремуму по максимуму, чего достигнет при расстоянии по гребню оползня, равном $L = 8,53$ м, для значения, равного $S_x = 0,019$ мм. Последующее стремление расстояния по гребню оползня L (м) к наибольшей длине оползня L (м) обеспечит непрерывное уменьшение перемещения, достигающего величины $S_x = 0,016$ мм, при значении $L_{\max} = 10,64$ м.

При постоянной влажности массива $F(x; 23)$ зафиксированы только отрицательные значения функции. При наименьшем расстоянии по гребню оползня L (м), равном $L = 0,0$ м, отрицательное значение перемещения горизонтального будет $S_x = -0,031$ мм. При стремлении расстояния по длине гребня оползня L (м) к наибольшему значению $L_{\max} = 10,64$ м перемещение горизонтальное S_x будет вначале стремиться к экстремуму по минимуму, чего достигнет при расстоянии по гребню оползня, равном $L = 6,05$ м, для значения, равного $S_x = -0,026$ мм. Последующее стремление расстояния по гребню оползня L (м) к наибольшей длине оползня L (м) обеспечит

непрерывное увеличение перемещения, достигающего величины $S_x = -0,031$ мм при значении $L_{\max} = 10,64$ м.

При наибольшей постоянной влажности массива $F(x; 36)$ зафиксированы только положительные значения функции. При наименьшем расстоянии по гребню оползня L (м), равном $L = 0,0$ м, положительное значение перемещения горизонтального будет $S_x = 0,160$ мм. При стремлении расстояния по длине гребня оползня L (м) к наибольшему значению $L_{\max} = 10,64$ м перемещение горизонтальное S_x будет вначале стремиться к экстремуму по максимуму, чего достигнет при расстоянии по гребню оползня, равного $L = 2,95$ м, для значения, равного $S_x = 0,164$ мм. Последующее стремление расстояния по гребню оползня L (м) к наибольшей длине оползня L (м) обеспечит непрерывное уменьшение перемещения, достигающего величины $S_x = 0,158$ мм при значении $L_{\max} = 10,64$ м.

Дальнейшее исследование грунтового массива предполагало анализ функции отклика по математической модели перемещений горизонтальных S_x (мм), по влажности массива W (%), при постоянной длине гребня оползня L (м): $F_1(0,0; y)$; $F_2(5,32; y)$; $F_3(10,64; y)$, что позволило получить следующие упрощенные уравнения:

$$F_1(0,0; y) = 6,98254 \cdot 10^{-4} \cdot y^2 - 0,02636 \cdot y + 0,20534, \quad (8)$$

$$F_2(5,32; y) = 6,98254 \cdot 10^{-4} \cdot y^2 - 0,0265 \cdot y + 0,21367, \quad (9)$$

$$F_3(10,64; y) = 6,98254 \cdot 10^{-4} \cdot y^2 - 0,02665 \cdot y + 0,21338. \quad (10)$$

Графическая интерпретация уравнений представлена на рисунке 8.

Прежде всего необходимо констатировать, что перемещения горизонтальные S_x (мм), по длине гребня оползня L (м), от переменной влажности массива W (%) и постоянной длине гребня оползня L (м): $F_1(0,0; y)$; $F_2(5,32; y)$; $F_3(10,64; y)$ имеют экстремальные значения и значимую сгруппированность визуализированных результатов, что подтверждает второстепенность длины гребня оползня как фактора на процесс перемещения гребня оползня.

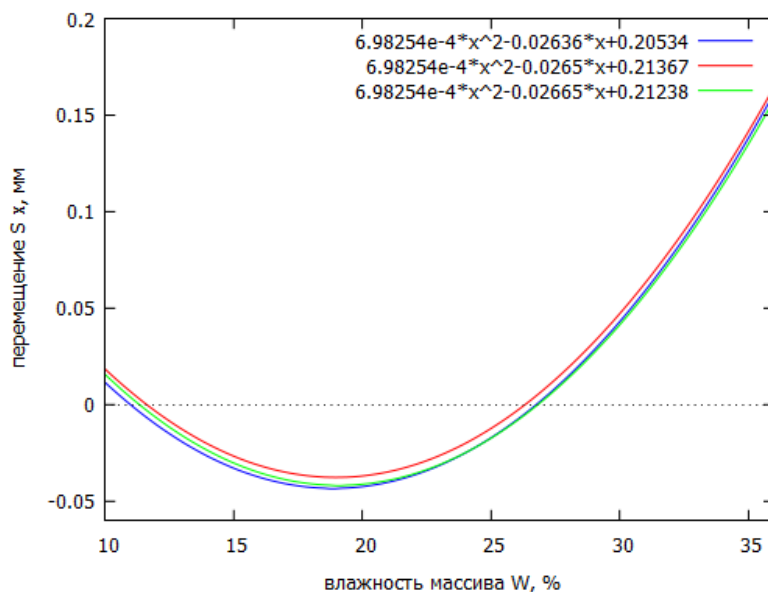


Рисунок 8 – Зависимость перемещений горизонтальных S_x (мм), по длине гребня оползня L (м), от переменной влажности массива W (%), и постоянной длине гребня оползня L (м), $F_1(0,0; y)$; $F_2(5,32; y)$; $F_3(10,64; y)$

Figure 8 – Dependence of horizontal displacements S_x (mm), along the landslide crest L (m) length, on the variable soil mass moisture content W (%), and the constant length of the landslide crest L (m), $F_1(0.0; y)$; $F_2(5.32; y)$; $F_3(10.64; y)$

Анализ математической модели и функции отклика при наименьшей постоянной длине гребня оползня L (м), $F_1(0,0; y)$ и при наименьшей влажности массива $W = 10\%$ позволяет фиксировать наименьшее положительное значение перемещения горизонтального $S_x = 0,011$ мм. При дальнейшем увеличении влажности массива W перемещение горизонтальное S_x будет убывать и вначале достигнет нулевого значения $S_x = 0,0$ мм, при влажности $W = 10,93\%$, а затем устремится к экстремуму по отрицательному максимуму, равному $S_x = -0,044$ мм, которого достигнет при влажности $W = 18,84\%$. Дальнейшее увеличение влажности опять обеспечит устойчивое стремление функции к нулевому значению $S_x = 0,0$ мм, что наступит при влажности $W = 26,78\%$, а затем перемещение устремится к положительным значениям и при наибольшей влажности 36% достигнет значения, равного $S_x = +0,16$ мм.

Анализ математической модели и функции отклика при средней постоянной длине гребня оползня L (м), $F_2(5,32; y)$ и при наименьшей влажности массива $W = 10 \%$, позволяет фиксировать наибольшее положительное значение перемещения горизонтального $S_x = 0,018$ мм для данного сечения. При дальнейшем увеличении влажности массива W перемещение горизонтальное S_x будет убывать и вначале достигнет нулевого значения $S_x = 0,0$ мм, при влажности $W = 11,67 \%$, а затем устремится к экстремуму по отрицательному максимуму, равному $S_x = -0,038$ мм, которого достигнет при влажности $W = 18,87 \%$. Дальнейшее увеличение влажности обеспечит опять устойчивое стремление функции к нулевому значению $S_x = 0,0$ мм, что наступит при влажности $W = 26,31 \%$, а затем перемещение устремится к положительным значениям и при наибольшей влажности 36% достигнет наибольшего положительного значения для данного сечения равного $S_x = +0,16$ мм.

Анализ математической модели и функции отклика при наибольшей постоянной длине гребня оползня L (м), $F_3(10,64; y)$ и при наименьшей влажности массива $W = 10 \%$ позволяет фиксировать положительное значение перемещения горизонтального $S_x = 0,0157$ мм. При дальнейшем увеличении влажности массива W перемещение горизонтальное S_x будет убывать и вначале достигнет нулевого значения $S_x = 0,0$ мм, при влажности $W = 11,23 \%$, а затем устремится к экстремуму по отрицательному максимуму равному $S_x = -0,042$ мм, которого достигнет при влажности $W = 19,18 \%$. Дальнейшее увеличение влажности обеспечит опять устойчивое стремление функции к нулевому значению $S_x = 0,0$ мм, что наступит при влажности $W = 26,82 \%$, а затем перемещение устремится к положительным значениям и при наибольшей влажности 36% достигнет наименьшего положительного значения для данного сечения, равного $S_x = +0,159$ мм.

Выводы. Исследованиями установлено весьма незначительное влияние фактора длины гребня оползня L (м) на функцию отклика, вместе

с тем необходимо отметить, что влажность грунтового массива W в пределах 11 % практически не оказывает влияния на перемещение горизонтальное S_x мм во всем диапазоне изменения длины оползня. При этом увеличение влажности оползневого массива до 29 % первоначально обеспечит положительные показатели перемещений, а затем практически такие же, но отрицательные горизонтальные перемещения, когда все они находятся в пределах $S_x = \pm 0,05$ мм, что несущественно для состояния грунтового массива. Однако дальнейшее увеличение влажности оползневого массива до 36 % приведет к приросту горизонтального перемещения более чем в 4 раза, что может спровоцировать фактический оползень. При этом, как показывает представленный алгоритм оценки поведения грунтового массива, в нем можно определить ту его влажность, которая обеспечит наименьшие горизонтальные перемещения и пределы допустимого изменения влажности.

Список источников

1. Стабилизация оползня на участке строительства железной дороги в г. Сочи / А. Н. Богомолов, С. И. Маций, Б. С. Бабаханов, Е. В. Безуглова, Д. В. Лейер, С. В. Кузнецова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 29(48). С. 15–25. EDN: RBUZHT.
2. Причины активизации оползня на Федеральной автомобильной дороге г. Сочи и мероприятия по его стабилизации / А. Н. Богомолов, С. И. Маций, С. Ю. Калашников, Б. С. Бабаханов, Е. В. Безуглова, Д. В. Лейер, С. В. Кузнецова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 29(48). С. 6–14. EDN: RBUZHJ.
3. Лейер Д. В., Серый, Н. Н., Любарский Д. Г. Особенности проектирования опор трубопроводов на оползневых склонах // Транспортные сооружения. 2021. Т. 8, № 3. DOI: 10.15862/02SATS321. EDN: XTKWHY.
4. Lari S., Frattini P., Crosta G. B. A probabilistic approach for landslide hazard analysis // Engineering Geology. 2014. Vol. 182, no. 1. 12 p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.015>.
5. Analysis of the stability of the Kuban River landslide slope involving the materials of landslide hazard monitoring / M. A. Bandurin, V. A. Volosukhin, I. A. Prikhodko, A. A. Rudenko // Construction and Geotechnics. 2023. Vol. 14, no. 4. P. 62–74. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.05. EDN: GJXUKZ.
6. Маций С. И., Федоровский В. Г., Рябухин А. К. Актуальные проблемы совершенствования нормативной базы в области инженерной защиты // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 4. С. 25–29. EDN: RFRFXA.
7. Finite-element simulation of possible natural disasters on landfall dams with changes in climate and seismic conditions taken into account / M. A. Bandurin, V. A. Volosukhin, A. V. Mikheev, Y. V. Volosukhin, V. V. Vanzha // Journal of Physics: Conference Series: International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 (ITBI 2018),

Tomsk, 17–20 January 2018. 2018. Vol. 1015. Article number: 032011. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032011. EDN: XXHUCD.

8. Численный метод вариантного проектирования чаши бассейна и его технико-экономическая оценка / О. Г. Дегтярева, С. Ю. Найденов, Т. И. Сафронова, Г. В. Дегтярев // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 69. С. 303–308. DOI: 10.21515/1999-1703-69-303-308. EDN: YPJLXL.

9. Дегтярев В. Г., Дегтярев Г. В., Дегтярева О. Г. Численное моделирование и цифровой математический анализ при исследовании сложных систем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 3(71). С. 540–553. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-53. EDN: GXGHRA.

10. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The finite element method: Its Basis & Fundamentals. Sixth edition. McGraw-hill, 2005. 733 p.

11. Оценка риска как мера повышения эффективности реализации геотехнического мониторинга на примере объекта в Южном федеральном округе / А. К. Рябухин, С. И. Маций, Е. В. Безуглова, Д. В. Лейер, Д. Г. Серый // Construction and Geotechnics. 2024. Т. 15, № 4. С. 15–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.02. EDN: MQVBWX.

12. Bandurin M. A., Yurchenko I. F., Volosukhin V. A. Remote Monitoring of Reliability for Water Conveyance Hydraulic Structures // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. P. 209–213. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.209. EDN: YAOJAD.

13. Zerkal O. V., Strom A. L. Classification of Cryogenic Landslides and Related Phenomena (by Example of the Territory of Russia) // Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Vol. 6. Specific Topics in Landslide Science and Applications. Springer, 2021. P. 377–383. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60713-5_37.

14. Сидаравичуте У. Р., Маций В. С. Экзогенные геологические процессы // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 92, № 192. С. 199–212. EDN: WCRAIN.

15. The foundation pit deep site ground state design modelling / G. V. Degtyarev, D. A. Datsjo, D. A. Vysokovsky, M. S. Turko // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. P. 396–401. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.396. EDN: YPTFNC.

16. Методы расчета противооползневых сооружений на сейсмическое воздействие / С. И. Маций, О. Ю. Ещенко, Н. Н. Любарский, С. А. Шелестов, В. С. Маций // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 5. С. 2–7. EDN: HEIJJD.

17. Calculation of Anti-Landslide Structures for Seismic Impacts / S. I. Matsii, O. Yu. Yeshchenko, N. N. Lyubarskii, S. A. Shelestov, V. S. Matsii // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2024. Vol. 61, no. 5. P. 403–410. DOI: 10.1007/s11204-024-09990-8. EDN: WMGPOC.

18. Кацко А. И., Маций С. И. Оценка состояния оползневого склона на основе анализа многомерных временных рядов данных геотехнического мониторинга // Природообустройство. 2024. № 3. С. 80–87. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-3-80-87. EDN: XXQWBE.

19. Assessment of the technical condition of bridge crossings on the main canals of irrigation systems / M. A. Bandurin, I. A. Prikhodko, I. P. Bandurina, A. A. Rudenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1138, no. 1. Article number: 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012002. EDN: KUCCNI.

20. Matsiy S. I., Sidaravichute U. R., Matsiy V. S. Risk assessment of debris flows in vulnerable areas // Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection: Proceedings of the 7th International Conference, Chengdu, China, 23–27 Sept. 2024. Moscow: Geomarketing LLC, 2024. P. 327–333. EDN: FMAEBN.

21. Шадунц К. III. Оползни-потоки. М.: Недра, 1983. 120 с.

References

1. Bogomolov A.N., Matsiy S.I., Babakhanov B.S., Bezuglova E.V., Leyer D.V., Kuznetsova S.V., 2012. *Stabilizatsiya opolznaya na uchastke stroitel'stva zheleznoy dorogi v*

g. Sochi [Landslide stabilization on the section of the railroad construction in Sochi]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bullet. of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], iss. 29(48), pp. 15-25, EDN: RBUZHT. (In Russian).

2. Bogomolov A.N., Matsiy S.I., Kalashnikov S.Yu., Babakhanov B.S., Bezuglova E.V., Leyer D.V., Kuznetsova S.V., 2012. *Prichiny aktivizatsii opolznya na Federal'noy avtomobil'noy doroge g. Sochi i meropriyatiya po yego stabilizatsii* [Causes of landslide activation on the federal road in Sochi and measures for its stabilization]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bullet. of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], iss. 29(48), pp. 6-14, EDN: RBUZHJ. (In Russian).

3. Leyer D.V., Sery N.N., Lyubarsky D.G., 2021. *Osobennosti proektirovaniya opor truboprovodov na opolznevykh sklonakh* [Design peculiarities of pipeline support on landslide slopes]. *Transportnye sooruzheniya* [Transport Structures], vol. 8, no. 3, DOI: 10.15862/02SATS 321, EDN: XTKWHY. (In Russian).

4. Lari S., Frattini P., Crosta G.B., 2014. A probabilistic approach for landslide hazard analysis. *Engineering Geology*, vol. 182, no. 1, 12 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.015>.

5. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Rudenko A.A., 2023. Analysis of the stability of the Kuban River landslide slope involving the materials of landslide hazard monitoring. *Construction and Geotechnics*, vol. 14, no. 4, pp. 62-74, DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.05, EDN: GJXUKZ.

6. Matsiy S.I., Fedorovsky V.G., Ryabukhin A.K., 2019. *Aktual'nye problemy sovershenstvovaniya normativnoy bazy v oblasti inzhenernoy zashchity* [Actual problems of the improvement of the regulation standards in the field of engineering protection]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering], no. 4, pp. 25-29, EDN: RFRFXA. (In Russian).

7. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Mikheev A.V., Volosukhin Y.V., Vanzha V.V., 2018. Finite-element simulation of possible natural disasters on landfall dams with changes in climate and seismic conditions taken into account. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference Information Technologies in Business and Industry (ITBI 2018)*, vol. 1015, article number: 032011, DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032011, EDN: XXHUCD.

8. Degtyareva O.G., Naidenov S.Yu., Safronova T.I., Degtyarev G.V., 2017. *Chislenny metod variantnogo proektirovaniya chashi basseyna i yego tekhniko-ekonomicheskaya otsenka* [Numerical method of the variant pool design and its technical and economic evaluation]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceed. of Kuban State Agrarian University], no. 69, pp. 303-308, DOI: 10.21515/1999-1703-69-303-308, EDN: YPJLXL. (In Russian).

9. Degtyarev V.G., Degtyarev G.V., Degtyareva O.G., 2023. *Chislennoe modelirovanie i tsifrovoy matematicheskiy analiz pri issledovanii slozhnykh sistem* [Numerical modeling and digital mathematical analysis in the study of complex systems]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovaniye* [Proceed. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 3(71), pp. 540-553, DOI: 10.32786/2071-9485-2023-03-53, EDN: GXGHRA. (In Russian).

10. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z., 2005. *The Finite Element Method: Its Basis & Fundamentals*. Sixth edition. McGrawhill, 733 p.

11. Ryabukhin A.K., Matsiy S.I., Bezuglova E.V., Leyer D.V., Sery D.G., 2024. *Otsenka riska kak mera povysheniya effektivnosti realizatsii geotekhnicheskogo monitoringa na primere ob"ekta v Yuzhnom federal'nom okruge* [Risk assessment as a measure to increase the efficiency of geotechnical monitoring using the example of an object in the Southern Federal District].

Construction and Geotechnics, vol. 15, no. 4, pp. 15-24, DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.02, EDN: MQVBWX. (In Russian).

12. Bandurin M.A., Yurchenko I.F., Volosukhin V.A., 2018. Remote Monitoring of Reliability for Water Conveyance Hydraulic Structures. Materials Science Forum, vol. 931, pp. 209-213, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.209, EDN: YAOJAD.

13. Zerkal O.V., Strom A.L., 2021. Classification of Cryogenic Landslides and Related Phenomena (by Example of the Territory of Russia). Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Vol. 6. Specific Topics in Landslide Science and Applications. Springer, pp. 377-383, https://doi.org/10.1007/978-3-030-60713-5_37.

14. Sidaravichute U.R., Matsiy V.S., 2024. *Ekzogennye geologicheskie protsessy* [Exogenous geological processes]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], vol. 92, no. 192, pp. 199-212, EDN: WCRAN. (In Russian).

15. Degtyarev G.V., Datsjo D.A., Vysokovsky D.A., Turko M.S., 2018. The foundation pit deep site ground state design modelling. Materials Science Forum, vol. 931, pp. 396-401, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.396, EDN: YPTFNC.

16. Matsiy S.I., Yeshchenko O.Yu., Lyubarsky N.N., Shelestov S.A., Matsiy V.S., 2024. *Metody rascheta protivopolznevnykh sooruzhenij na seismicheskoe vozdejstvie* [Methods for calculating landslide protection structures for seismic impact]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering], no. 5, pp. 2-7, EDN: HEIJD. (In Russian).

17. Matsii S.I., Yeshchenko O.Yu., Lyubarskii N.N., Shelestov S.A., Matsii V.S., 2024. Calculation of Anti-Landslide Structures for Seismic Impacts. Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 61, no. 5, pp. 403-410, DOI: 10.1007/s11204-024-09990-8, EDN: WMGPOC.

18. Katsko A.I., Matsiy S.I., 2024. *Otsenka sostoyaniya opolzneвого sklona na osnove analiza mnogomernykh vremennykh ryadov dannykh geotekhnicheskogo monitoringa* [Assessment of the state of a landslide slope based on the analysis of multidimensional time series of geotechnical monitoring data]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 80-87, DOI: 10.26897/1997-6011-2024-3-80-87, EDN: XXQWBE. (In Russian).

19. Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Bandurina I.P., Rudenko A.A., 2023. Assessment of the technical condition of bridge crossings on the main canals of irrigation systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1138, no. 1, article number: 012002, DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012002, EDN: KUCCNI.

20. Matsiy S.I., Sidaravichute U.R., Matsiy V.S., 2024. Risk assessment of debris flows in vulnerable areas. Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection: Proceed. of the 7th International Conference. Moscow, Geomarketing LLC, pp. 327-333, EDN: FMAEBN.

21. Shadunts K.Sh., 1983. *Opolzni-potoki* [Landslides-flows]. Moscow, Nedra Publ., 120 p. (In Russian).

Информация об авторах

Г. В. Дегтярев – профессор, доктор технических наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), degtyarev.g.v@mail.ru, AuthorID: 144403, ORCID: 0000-0002-1451-4489;

Д. В. Лейер – доцент, кандидат технических наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), dasha_leyer@mail.ru, AuthorID: 794169, ORCID: 0000-0001-9893-030X;

О. Г. Дегтярева – доцент, доктор технических наук, Кубанский государственный аг-

арный университет имени И. Т. Трубилина (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), degtyareva.o.g@mail.ru, AuthorID: 723746, ORCID: 0000-0001-9312-9222.

Information about the authors

G. V. Degtyarev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Kalinin, 13), AuthorID: 144403, degtyarev.g.v@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1451-4489;

D. V. Leyer – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Kalinin, 13), AuthorID: 794169, dasha_leyer@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9893-030X;

O. G. Degtyareva – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Kalinin, 13), AuthorID: 723746, degtyareva.o.g@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9312-9222.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.04.2025; одобрена после рецензирования 22.09.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 21.04.2025; approved after reviewing 22.09.2025; accepted for publication 29.09.2025.