

БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА (2.1.15. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья
УДК 519.8+614.8:628.4
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.30.3.016

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГНОЗНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА НА ПОЛИГОНЕ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

*Игорь Михайлович Ламков*¹
*Валерий Степанович Хорошилов*²
*Александр Юрьевич Чермошентцев*³

¹Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

^{2,3}Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Автор ответственный за переписку: Игорь Михайлович Ламков, igor.lamkov@ya.ru

Аннотация. В статье рассмотрены методические подходы прогнозирования оползней склонов городских полигонов твердых коммунальных отходов на основе построения кинематической модели деформации поверхностей. Выполненный обзор отечественных и зарубежных публикаций по тематике моделирования и прогнозирования оползней на полигонах коммунальных отходов позволил сформулировать общие закономерности формирования оползня и параметров его движения. На основе мониторинга склона полигона беспилотным летательным аппаратом получены разновременные координаты контрольных точек, которые использовались для построения прогнозной модели. По результатам построения кинематической модели выделена область склона полигона с наиболее вероятным оползневым процессом.

Ключевые слова: прогнозная кинематическая модель, мусорный оползень, цикл наблюдений, контрольная точка

Для цитирования: Ламков И.М., Хорошилов В.С., Чермошентцев А.Ю. Использование прогнозной математической модели для исследования динамики оползневого процесса на полигоне коммунальных отходов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 3 (30). С. 8-17. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2023.30.3.016>.

USING A PREDICTIVE MATHEMATICAL MODEL TO STUDY THE DYNAMICS OF A LANDSLIDE PROCESS AT A MUNICIPAL WASTE LANDFILL

*Igor M. Lamkov*¹
*Valery S. Khoroshilov*²
*Alexander Yu. Chermoshentsev*³

¹Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

^{2,3}Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Corresponding author: Igor M. Lamkov, igor.lamkov@ya.ru

Abstract. The article discusses methodological approaches to predicting landslides on the slopes of urban landfills of municipal solid waste based on the construction of a kinematic model of surface deformation. The review of domestic and foreign publications on the subject of modeling and forecasting landslides at municipal waste landfills allowed us to formulate general patterns of landslide formation and parameters of its movement. Based on the monitoring of the slope of the polygon by an unmanned aerial vehicle, the coordinates of control points of different times were obtained, which were used to build a predictive model. Based on the results of the construction of the kinematic model, the area of the slope of the polygon with the most probable landslide process is highlighted.

Keywords: predictive kinematic model, garbage landslide, observation cycle, control point

For citation: Lamkov I.M., Khoroshilov V.S., Chermoshentsev A.Yu. Using a predictive mathematical model to study the dynamics of a landslide process at a municipal waste landfill // Siberian Fire and Rescue Bulletin.2023;3(30):8-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2023.30.3.016>.

Введение

Известной проблемой воздействия на окружающую среду является функционирование полигонов отходов, связанных с жизнедеятельностью человека [1]. В последние годы последствия их складирования на городских территориях привлекает к себе внимание общественных организаций, специалистов здравоохранения и охраны окружающей среды, представителей власти различного уровня. По словам премьер-министра М.В. Мишустина: «Ликвидация опасных объектов накопленного вреда – один из самых чувствительных вопросов для граждан», на реализацию национальных проектов «Экология» и «Чистая страна» в 2022 г. выделяется около 30 млрд рублей [2]. Ежегодной проблемой является возгорания отходов, площадь которых может достигать тысяч квадратных метров, борьба с которыми продолжается длительное время.

В конце XX – начале XXI века для населения со стороны хранилищ мусора появилась и другая проблема – выбросы свалочного газа из тела полигона вследствие подвижек его слагающих масс. Одним из примеров может служить полигон коммунальных отходов «Ядрово» Волоколамского района Московской области, где 21 марта 2018 г. в результате трещин слагающих грунтов зафиксирован выброс свалочного газа, в результате которого более 70 детей из ближайших школ были направлены за медицинской помощью [3]. Исследования глубинных отвалов мусора показывают, что среди веществ, образующихся в результате химических реакций, могут быть алканы, ароматические углеводороды, терпены, соединения хлора и серы [4]. Таким образом, залповый выброс свалочного газа с полигона коммунальных отходов сопоставим с химической аварией на производственном объекте.

Завершением эксплуатации любого полигона является его рекультивация, которая заключается в стабилизации тела полигона (засыпание грунта провалов и трещин, создание необходимого угла наклонов откосов), сооружение систем для сбора свалочного газа, удаления фильтрата и поверхностного стока, создание многофункционального защитного экрана и др.

В практике рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) отмечается, что самой частой проблемой формирования требуемых углов склонов становятся нарушения проектных решений по складированию мусора. По данным Казаковой [5] уполаживание склонов на конечном этапе становится невыполнимой задачей, поскольку на откосах с углом заложения круче 1:3 не может работать дорожная техника. Поэтому заблаговременное прогнозирование оползней на данных техногенных объектах является важной задачей в области предупреждения химического заражения населения и территорий.

Обзор публикаций [6; 7; 8; 9] показывает, что исследования отечественных ученых в большей степени направлены на изучение экологических, химических и биологических параметров полигонов ТКО, в то время как проблеме возникновения мусорных оползней уделяется недостаточное внимание.

Исследования зарубежных авторов [10;11;12;13;14] значительно глубже затрагивают вопросы возникновения оползней на мусорных полигонах. На основе статистических данных о метеорологических условиях в районе свалок, изучении материалов и веществ, слагающих тело полигона, опросах очевидцев, выделяются некоторые механизмы запуска оползневых лавин:

- ошибки в проектировании системы отвода фильтрационных вод, приводящие к переувлажнению тела полигона и снижению силы трения между слоями захороненных отходов [15];

- неправильная эксплуатация полигона. В работе [16] отмечено, что обрушение мусорного полигона Kettleman (Калифорния, США) произошло в результате достижения критической высоты заполнения отходами;

- высокая плотность городской застройки в сочетании с малой санитарной зоной между хранилищем отходов и жилой зоной (менее 100 м). За счет этого показателя зафиксировано наибольшее количество погибших людей в Китае, Филиппинах, Эфиопии, Индонезии;

- длительное воздействие осадков, которое привело к увеличению массы отходов (обрушение свалки Leuwigajah (Ява, Индонезия) [17], обвал склона полигона Payatas (Кесон-Сити, Филиппины) [18];

- неоднородный состав отходов, обладающий низкой проницаемостью, препятствует дренажу влаги и способствуют ее накоплению в отдельных областях [19];

- использование для изоляции уплотненных отходов глинистых грунтов. По данным [20], склон хранилища отходов Dona Juana (Богота, Колумбия) стал нестабильным через два года после засыпки, в результате его обрушения произошло перемещение 1,5 миллионов тонн мусора в сторону реки Тунхуэлито;

- возникновение глубинных очагов возгораний и взрывы биогаза как результат сбоя технологического процесса по его сбору и утилизации и последующее динамическое воздействие на все слои полигона (свалка Umraniye-Hekimbashi, Стамбул) [21];

- движение слоев мусора в горизонтальном направлении со скоростью 10 мм в сутки является предпосылкой для схода оползня [22].

Данные причины не позволяют оценивать условия, определяющие стабильность свалки и прогнозировать сход возникновения мусорных лавин по схеме, используемой для анализа естественных и техногенных оползней.

Как утверждает коллектив авторов [23] на основании анализа технической литературы мониторинг и прогнозирование оползневой опасности развивается преимущественно в двух направлениях. Первое включает разработку методов прогнозирования подверженности исследуемых территорий оползневой опасности, второе – создание эффективных моделей для прогнозирования динамики отдельных оползней.

В ряде случаев разработка прогнозных моделей для второго случая дает лучшие результаты в силу того, что они могут предсказать будущее развитие оползня.

Материалы и методы

Объектом исследования является территория одного из действующих полигонов твердых коммунальных отходов, расположенного в правобережной части г. Новосибирска [24]. Полигон формировался таким образом, что один из его секторов со временем стал вплотную подходить к застроенной территории, включающей промышленную зону, что являлось нарушением безопасности ее функционирования. Данный сектор был выведен из технологического процесса по утилизации мусора, однако рекультивация не проводилась, так как наполняемость этого участка была значительно ниже проектной. На огражденном участке в течение нескольких лет (2018, 2019, 2021, 2022 г.) выполнялся мониторинг, который включал аэрофотосъемку с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). В качестве контрольных точек (их общее число составило 30) выбирались фрагменты мусорных композитов: куски бетона, арматуры,

габаритный неразлагающийся мусор. Координаты XU контрольных точек определялись по цифровой модели местности (ЦММ) на данную территорию (рис.1) с точностью порядка 10 см.

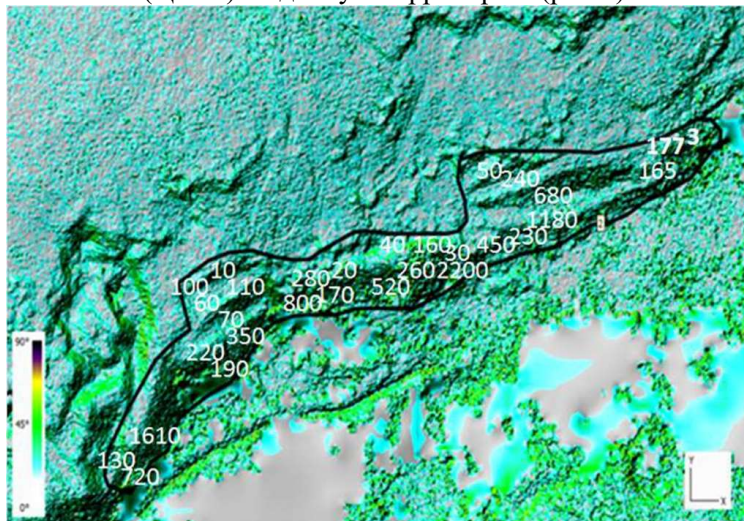


Рис.1. Расположение контрольных точек на ЦММ полигона ТК0

Дальнейший процесс изучения динамики перемещения оползневых масс заключался в анализе изменения координат контрольных точек в течение временных циклов наблюдений с помощью прогнозной математической модели. Всего было исследовано пять циклов наблюдений с интервалом в 1 год, из них четыре использовались для построения самой прогнозной модели (период основания прогноза), пятый – для сравнения имеющихся перемещений с результатами полученного прогноза (период упреждения).

Техногенные оползни полигонов ТК0 могут рассматриваться как случайный процесс деформации поверхностей, так как зависит от факторов, практически не подлежащих систематизации. Математическая модель случайного процесса деформации может быть представлена в кинематической и динамической формах в зависимости от полноты и вида исходных данных [25]. С учетом того, что на действующем полигоне ТК0 практически невозможно исследовать процесс деформации поверхностей с учетом совместного влияния времени и главных воздействующих факторов, рассмотренных выше, прогнозирование возможной динамики склонов выполнялось по кинематической модели методом экстраполяции по результатам наблюдений за перемещениями оползневых масс.

Моделирование процессов деформации поверхностей осуществлялось на основе корреляционной теории случайных функций.

Алгоритм построения кинематической модели содержит следующие процессы: исследование на нормальность распределения приближенным методом путем вычисления оценок асимметрии и эксцесса; анализ линейности процесса с использованием коэффициентов вариации; оценивание параметров модели; нахождение прогноза и объективности его точности.

Результаты выполненного анализа позволяют утверждать, что процесс, представленный выборкой перемещения оползневых масс, подчиняется закону нормального распределения, что позволяет правомерно использовать аппарат метода наименьших квадратов для последующих вычислений.

Вид прогнозной кинематической модели представляет собой модель перемещения оползневых масс и имеет следующий вид:

$$m(t_2 / t_1) = \hat{m}_{x_i}(t_2 / t_1) + \hat{r}_x(t_2, t_1) \frac{\hat{\sigma}_x(t_2 / t_1)}{\hat{\sigma}_x(t_1)} \Delta x(t_1). \quad (1)$$

где t_1 – время конца периода основания прогноза (время, на котором строилась модель);

t_2 – период упреждения (время, на которое выполняется прогноз);

$m(t_2 / t_1)$ – окончательное прогнозное значение перемещения оползневых масс по модели

(1) для координаты X ;

$\hat{m}_x(t_2 / t_1)$ – прогноз перемещения по оси X ;

$\hat{\sigma}_x(t_2 / t_1)$ – ожидаемая точность прогнозирования;

$\tilde{\sigma}_x(t_1)$ – вычисленное значение стандарта на время конца периода основания прогноза;

$\hat{r}_x(t_2, t_1)$ – прогнозное значение коэффициента корреляции во времени – зависимость

между экспериментальными данными (наблюдениями) и прогнозируемыми значениями. Коэффициент корреляции или в общем виде корреляционное отношение η может иметь значения от 0 до 1, что указывает на необоснованность или пригодность построенной модели.

Окончательная прогнозная математическая модель для одной из координат (X) имеет вид:

$$\hat{m}_x(t_j) = 632326,879 + 0,0306 t_j; \quad (2)$$

$$\frac{1}{\hat{\sigma}_x(t_j)} = -0,000027 \frac{1}{t_j} + 0,015417; \quad (3)$$

$$\tilde{r}_x(t_2, t_1) = 1,0000832 e^{-0,0000473 t_j}. \quad (4)$$

В общем виде для оценки качества построения моделей (2,3,4) были вычислены корреляционные отношения, значения которых оказались близкими к единице, что свидетельствует о их достаточном высоком качестве.

$$\eta_{yx} = 0,844; \quad \eta_{\sigma t} = 0,975; \quad \eta_{rt} = 0,821. \quad (5)$$

Результаты прогнозирования по координате X с использованием выражения (1) представлены в таблице. Для выборки из 30-ти контрольных точек, расхождения между результатами измерений и их прогнозными значениями лежат в пределах заданной точности, не превышающей утроенной величины стандарта. Рассчитанная прогнозная точность измерений для заданной выборки зависит от принятой точности и метода измерений. Результаты прогнозирования следует признать успешными, так как ни одна из ошибок между прогнозными и измеренными значениями перемещений не превысило заданную величину.

Табл. Результаты прогнозирования на последний цикл наблюдений

№ точки	Результат измерения, м	Прогнозные значения, м	Ошибка, м
3	632425.893	632425,890	0,003
10	632262.315	632262,366	-0,051
20	632324.312	632324,358	-0,046
30	632361.176	632361,220	-0,043
40	632345.676	632345,702	-0,026
50	632387.032	632387,074	-0,041
60	632269.988	632270,039	-0,051
70	632282.813	632282,863	-0,05
100	632254.902	632254,954	-0,052
110	632264.795	632264,846	-0,051

130	632224.872	632224,924	-0,052
160	632344.824	632344,869	-0,045
165	632418.346	632418,385	-0,039
170	632320.209	632320,256	-0,047
177	632418.992	632418,976	0,016
190	632254.473	632254,525	-0,052
220	632247.019	632246,545	0,074
230	632382.450	632382,492	-0,042
240	632403.783	632403,823	-0,04
260	632377.712	632377,754	-0,042
280	632325.406	632325,305	0,101
350	632270.925	632270,943	-0,018
450	632381.864	632381,906	-0,042
520	632328.442	632328,488	-0,046
680	632402.998	632403,023	-0,025
720	632234.298	632234,340	-0,043
800	632303.341	632303,389	-0,048
1180	632400.923	632400,887	0,036
1610	632226.976	632226,988	-0,012
2200	632363.786	632363,829	-0,043

Результаты

На основе координат, вычисленных по прогнозной модели, определены точки со смещением >10 мм [22], по которым выделена область склона полигона ТКО с наиболее вероятно возможным оползневым процессом (рис.2).

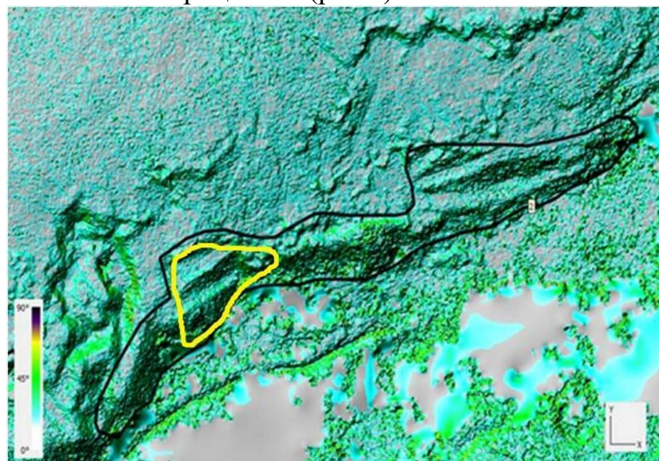


Рис.2. Прогнозируемая зона оползня

Заключение

Выполненные исследования позволяют сделать вывод об эффективности использования прогнозной кинематической модели для выявления участков полигона ТКО, подверженных риску схода оползня. В целях достоверности определения координат контрольных точек, обязательным условием является вывод исследуемого участка полигона ТКО из эксплуатации или завершение работ по его рекультивации.

Список источников

1. Новицкий М.Л., Азиатцева М.В. Современные тенденции, состояние и особенности рекультивации полигонов твердых бытовых отходов // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2022. № 3(164). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-tendentsii>

sostoyanie-i-osobennosti-rekultivatsii-poligonov-tvyordyh-bytovykh-othodov-obzor (дата обращения: 22.02.2023).

2. Кабмин обсудил ликвидацию свалок и ситуацию с квалифицированными кадрами // RG.RU : Интернет-портал «Российской газеты». 2023. 20 февр. URL: <https://rg.ru/2023/02/20/chistaia-strana.html>.

3. Выброс газа на полигоне «Ядрово». Обобщение // Interfax.ru : информ. группа «Интерфакс». М., 2018. 21 марта. URL: <https://www.interfax.ru/moscow/604588>.

4. Харламова М.Д., Курбатова А.И. Твердые отходы: технологии утилизации, методы контроля, мониторинг. – М.: Изд-во «Юрайт», 2019. – 311 с.

5. Казакова Л.Г. Рекультивация территорий несанкционированных свалок урбанизированных зон // Вестник СибГИУ. 2018. № 2 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rekultivatsiya-territoriy-nesanktsionirovannyh-svalok-urbanizirovannyh-zon> (дата обращения: 26.02.2023).

6. Соколов Ю.И. Риски мусорной экологической катастрофы России // Проблемы анализа риска. 2018. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/riski-musornoy-ekologicheskoy-katastrofy-rossii> (дата обращения: 27.02.2023).

7. Экологическое обоснование места размещения полигона твердых бытовых отходов / Е.В. Левин, Р.Ф. Сагитов, Т.А. Гамм, С.В. Шабанова, В.Д. Баширов // Известия ОГАУ. 2016. № 3 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskoe-obosnovanie-mesta-razmescheniya-poligona-tvyordyh-bytovykh-othodov> (дата обращения: 12.03.2023).

8. Туктарова Ю.Ю., Евстифеева Т.А. Расчет количественных характеристик выбросов газообразных загрязняющих веществ, входящих в состав биогаза, в атмосферу от проектируемого полигона ТБО г. Сорочинска // Проблемы науки. 2016. № 4 (5). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-kolichestvennyh-harakteristik-vybrosov-gazoobraznyh-zagryaznyayuschih-veschestv-vhodyaschih-v-sostav-biogaza-v-atmosferu-ot> (дата обращения: 18.03.2023).

9. Тимофеева С.С., Тимофеев С.С., Шешукова Л.В. Профессиональные риски персонала полигонов по захоронению твердых бытовых отходов // Вестник ИрГТУ. 2013. № 2 (73). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/professionalnye-riski-personala-poligonov-po-zahoroneniyu-tverdyh-bytovykh-othodov> (дата обращения: 19.03.2023).

10. Bray J.D., Zekkos D., Kavazanjian E.J., Athanapoulos G.A., Reimer M. Shear strength of municipal solid waste. ASCE J Geotechnical Geoenvironmental Eng 2009, 135(6). – P. 709–722. 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000063.

11. Koerner R.M., Soong T.-Y. Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures. In Advances in Transportation and Geoenvironment Systems Using Geosynthetics. Edited by: Zornberg J.G., Christopher BR. ASCE GSP N°103, Denver, Colorado, 2000. – P. 1–38. – 10.1061/40515(291)1.

12. Eid H.T., Stark T.D., Evans W.D., Sherry P.E. Municipal solid waste slope failure: waste and foundation soil properties. J Geotech Geoenviron. Eng ASCE 2000. 126(5). – P. 397–407. – 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(397).

13. Thusyanthan N.I., Madabhushi S.P., Singh S. Centrifuge modeling of solid waste landfill systems. Part 1: Development of a model municipal solid waste // ASTM geotechnical testing journal. 2006. 29(3). – P. 217–222.

14. Peng R., Hou Y.J., Zhang X.D. et al. Development of a Homogeneous Model Municipal Solid Waste. Advanced Materials Research. 2014. 831. – P. 331–335.

15. Blight G.E. Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review // Waste Manage Res. 2008. 26(5): 448–463. 10.1177/0734242X07087975.

16. Chang M. Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism // Comput Geotech. 2005. 32. – P. 587–599. 10.1016/j.compgeo.2005.11.002.

17. Lavigne F., Wassmer P., Gomez C. et al. The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia // *Geoenviron Disasters* 1, 10 (2014). – <https://doi.org/10.1186/s40677-014-0010-5>.

18. Merry S.M., Kavazanjian Jr.E., Fritz W.U. Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure // *Journal of Performance of constructed Facilities*. 2005. 19(2). – P. 100–107.

19. Bauer J., Kölsch F., Borgatto A.V.A. Stability Analysis According to Different Shear Strength Concepts Exemplified by two Case Studies // Ueda F. (ed) *Proceedings of the 5th APLAS*. Sapporo (Japan). 2008.

20. Hendron D.M., Fernandez G., Prommer P.J. et al. Investigation of the cause of the 27 September 1997 slope failure at the Dona Juana landfill // *Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy. 1999. – P. 545–554.

21. Kocasoy G., Curi K. The Ümraniye-Hekimbasi open dump accident // *Waste Manage Res*. 1995. 13(4). – P. 305–314.

22. Zhan L.T., Luo X.Y., Chen Y.M. et al. Field monitoring items and warning values for slope safety of MSW landfills // *Chinese Journal of Rock Mechanic Engineering*. 2012. 34. – P. 1305–1312.

23. Карпик А.П., Хорошилов В.С., Комиссаров А.В. Анализ методов и средств изучения динамики перемещений оползневых склонов // *Вестник СГУГиТ*. – 2021. – Т. 26, № 6. – С. 17–32.

24. Чермошенцев А.Ю., Ламков И.М., Приданова О.В. Особенности проведения мониторинга оползневых процессов на полигонах твердых коммунальных отходов с применением материалов аэрофотосъемки // *Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник»*. – 2023. – № 1. – С. 23–30. – Режим доступа: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2023/v1/N28_23-30.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

25. Хорошилов В.С., Гуляев Ю.П. Математическое моделирование. Анализ и прогнозирование деформаций сооружений по геодезическим данным на основе кинематической модели: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 92 с. – ISBN 978-5-87693-505-2.

References

1. Novitsky M.L., Asiantseva M.V. Modern trends, state and features of recultivation of landfills of solid household waste // *Plant biology and horticulture: theory, innovations*. 2022. № 3(164). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-sostoyanie-i-osobennosti-rekultivatsii-poligonov-tvyordyh-bytovyh-othodov-obzor> (accessed: 22.02.2023).

2. The Cabinet of Ministers discussed the liquidation of landfills and the situation with qualified personnel // *RG.EN: The Internet portal of "Rossiyskaya Gazeta"*. 2023. February 20. URL: <https://rg.ru/2023/02/20/chistaia-strana.html>.

3. Gas release at the Yadrovo landfill. Generalization // *Interfax.ru: inform. group "Interfax"*. Moscow, 2018. March 21. URL: <https://www.interfax.ru/moscow/604588>.

4. Kharlamova M.D., Kurbatova A.I. Solid waste: recycling technologies, control methods, monitoring. Moscow: Yurayt Publishing House. 2019. – 311 p.

5. Kazakova L.G. Recultivation of territories of unauthorized landfills of urbanized zones // *Bulletin of SibGIU*. 2018. No. 2 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rekultivatsiya-territoriy-nesanktsionirovannyh-svalok-urbanizirovannyh-zon> (accessed: 02/26/2023).

6. Sokolov Yu.I. Risks of a garbage ecological catastrophe in Russia // *Problems of risk analysis*. 2018. No.2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/riski-musornoy-ekologicheskoy-katastrofy-rossii> (accessed: 02/27/2023).

7. Levin E.V., Sagitov R.F., Gamm T.A., Shabanova S.V., Bashirov V.D. Ecological justification of the location of the landfill of solid household waste // *Izvestiya OGAU*. 2016. № 3 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskoe-obosnovanie-mesta-razmescheniya-poligona-tvyordyh-bytovyh-othodov> (accessed 12.03.2023).

8. Tuktarova Yu.Yu., Evstifeeva T.A. Calculation of quantitative characteristics of emissions of gaseous pollutants that are part of biogas into the atmosphere from the projected landfill of solid waste in Sorochinsk // *Problems of Science*. 2016. No.4 (5). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-kolichestvennyh-harakteristik-vybrosov-gazooobraznyh-zagryaznyayuschih-veschestv-vhodyaschih-v-sostav-biogaza-v-atmosferu-ot> (accessed: 03/18/2023).
9. Timofeeva S.S., Timofeev S.S., Sheshukova L.V., Professional risks of personnel of landfills for solid household waste disposal // *Bulletin of IrSTU*. 2013. № 2 (73). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/professionalnye-riski-personala-poligonov-po-zahoroneniyu-tverdyh-bytovyh-othodov> (accessed: 03/19/2023).
10. Bray J.D., Zekkos D., Kavazanjian E.J., Athanasopoulos G.A., Reimer M. Shear strength of municipal solid waste. *ASCE J Geotechnical Geoenvironmental Eng* 2009,135(6):709–722. 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000063.
11. Koerner R.M., Soong T.-Y. Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures. In *Advances in Transportation and Geoenvironment Systems Using Geosynthetics*. Edited by: Zornberg J.G., Christopher BR. ASCE GSP N°103, Denver, Colorado; 2000:1–38. 10.1061/40515(29)1.
12. Eid H.T., Stark T.D., Evans W.D., Sherry P.E. Municipal solid waste slope failure: waste and foundation soil properties. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 2000,126(5):397–407. 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(397)
13. Thusyanthan N.I., Madabhushi S.P., Singh S. Centrifuge modeling of solid waste landfill systems. Part 1: Development of a model municipal solid waste // *ASTM geotechnical testing journal*, 2006. 29(3): 217–222.
14. Peng R., Hou Y.J., Zhang X.D. et al. Development of a Homogeneous Model Municipal Solid Waste. *Advanced Materials Research*, 2014. 831: 331–335.
15. Blight G.E. Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review // *Waste Manage Res* 2008,26(5):448–463. 10.1177/0734242X07087975.
16. Chang M. Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism. *Comput Geotech* 2005. 32: 587–599. 10.1016/j.compgeo.2005.11.002
17. Lavigne, F., Wassmer, P., Gomez, C. et al. The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia. *GEOENVIRON DISASTERS* 1, 10 (2014). <https://doi.org/10.1186/s40677-014-0010-5>
18. Merry S.M., Kavazanjian Jr.E., Fritz W.U. Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure // *Journal of Performance of constructed Facilities*. 2005. 19(2): 100–107.
19. Bauer J., Kölsch F., Borgatto A.V.A. Stability Analysis According to Different Shear Strength Concepts Exemplified by two Case Studies // Ueda F (ed) *Proceedings of the 5th APLAS*. Sapporo (Japan). 2008.
20. Hendron D.M., Fernandez G., Prommer P.J. et al. Investigation of the cause of the 27 September 1997 slope failure at the Dona Juana landfill. In: *Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy, 1999. 545–554.
21. Kocasoy G., Curi K. The Ümraniye-Hekimbasi open dump accident. *Waste Manage Res* 1995,13(4):305–314.
22. Zhan L.T., Luo X.Y., Chen Y.M. et al. Field monitoring items and warning values for slope safety of MSW landfills // *Chinese Journal of Rock Mechanic Engineering*. 2012. 34. 1305–1312.
23. Karpik A.P., Khoroshilov V.S., Komissarov A.V. Analysis of methods and means for studying the dynamics of landslide slope movements // *Vestnik SGUGiT*. – 2021. – T. 26, No.6. – P. 17–32.
24. Chermoshentsev A.Yu., Lamkov I.M., Pridanova O.V. Features of monitoring landslide processes at landfills of municipal solid waste using aerial photography materials // *Scientific and analytical journal "Siberian Fire and Rescue Bulletin"*, 2023, No. 1. – P. 23–30. – Access mode: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2023/v1/N28_23-30.pdf, free. – Blank from the screen. — Yaz. rus., Eng.

25.Khoroshilov V.S., Gulyaev Yu.P. Mathematical modeling. Analysis and prediction of deformations of structures based on geodetic data based on a kinematic model : textbook. – Novosibirsk: SGGA, 2012. – 92 p. – ISBN 978-5-87693-505-2. – Text: direct.

Информация об авторах

И.М. Ламков - кандидат технических наук

В.С. Хорошилов - доктор технических наук

А.Ю. Чермошенцев - кандидат технических наук

Information about the author

I.M. Lamkov - Ph.D. of Engineering Sciences

V.S. Khoroshilov - Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences

A.Yu. Chermoshentsev - Ph.D. of Engineering Sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакция 12.05.2023; одобрена после рецензирования 07.08.2023; принята к публикации 26.09.2023.

The article was submitted 12.05.2023, approved after reviewing 07.08.2023, accepted for publication 26.09.2023.