

# ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

## 1. Аннотация

В работе рассматривается математическая модель взаимодействия жидкого оползня с водой в результате его движения со склона. Модель описывается трёхкомпонентной системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса с переменной вязкостью и плотностью, где три компоненты среды представляют собой воздух, воду и жидкий оползень соответственно. Решение получено при помощи конечно-разностного численного алгоритма, основанного на схеме расщепления по физическим факторам и методе предиктор–корректор. Проведены численные расчеты по сходу подводных и надводных оползней различных форм в водный бассейн.

## 2. Тема работы

Численное моделирование возникновения и распространения поверхностных волн в результате схода оползня

## 3. Состав коллектива

- Захаров Юрий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, руководитель
- Зимин Антон Игоревич, к.ф.-м.н., доцент кафедры цифровых технологий, Кемеровский государственный университет, исполнитель

## 4. Научное содержание работы:

### 4.1. Постановка задачи

Целью работы является моделирование взаимодействия жидкого оползня с водой в результате его движения со склона. Подводный оползень представляет собой большую массу грунта и осадочных пород, которая под действием собственного веса движется по склону дна. Такое движение вызывает на поверхности воды волны, представляющие опасность для населения и сооружений на прибрежных территориях. Горные оползни и сели могут представлять опасность для близлежащих инфраструктурных и природных объектов. Для предотвращения или смягчения последствий необходимо проводить комплексное исследование условий, факторов и предпосылок возникновения оползней.

В работе используется модель трехкомпонентной вязкой несжимаемой жидкости с переменными вязкостью и плотностью. Вода, воздух и жидкий оползень рассматриваются как компоненты неоднородной среды. Преимуществом такого подхода является универсальность, позволяющая моделировать взаимодействие жидкости с различными препятствиями и грунтами без выделения особенностей в решение.

В работе рассматривается две задачи: 1) возникновение и распространение поверхностной волны в результате движения подводного оползня по склону дна; 2) сход селевого оползня со склона берега в Богучанское водохранилище в долине реки Буря.

## 4.2. Современное состояние проблемы

В настоящее время имеются различные математические модели для моделирования селевых и оползневых процессов. В работе [1] приводится следующая классификация моделей с учетом специфики представления в модели механизма селевого или склонового процесса: непрерывные модели, клеточные автоматы и дискретные модели. В основе непрерывных моделей лежат уравнения непрерывности и движения вязкой жидкости в виде уравнения Навье-Стокса или в ее интегрированной по глубине гидравлической форме – уравнений движения Сен-Венана [2]. Клеточные автоматы представляют движение потока вещества как закономерную смену состояний пространственных ячеек в направлении движения потока. То есть процесс представляется не в виде изменения физических величин, а как закономерная последовательная смена состояний пространственных ячеек заданной формы и размера [3]. Дискретные модели представляют движение потока вещества в виде движения совокупности отдельных структурных частиц. В основе дискретных моделей лежит уравнение движения структурных частиц – материальных точек или твердых тел, получаемое непосредственно из второго закона Ньютона [1, 4].

Обычно подводный оползень представляется моделью твердого тела, которая движется по плоскому склону, а для моделирования движения поверхностных волн используют различные варианты: модели мелкой воды и модели, основанные на уравнениях Буссинеска [5–7] или полную систему уравнений Навье-Стокса [8, 9]. Однако во многих реальных задачах требуется учитывать неровность подводного склона и возможность деформации оползня. В этом случае оползень представляется моделью квазидеформируемого тела [10], либо жидкостью с отличными от воды параметрами [8, 9, 11].

В данной работе для моделирования селевых и подводных оползней применяется модель трехкомпонентной вязкой несжимаемой жидкости [12, 13].

1. Михайлов, В.О. Математическое моделирование селей, обвалов и оползней / В.О. Михайлов, С.С. Черноморец – 2011. – 131 с.
2. Sheridan, M.F. Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington / M.F. Sheridan, A.J. Stinton, A. Patra, E.B. Pitman, A. Bauer, C.C. Nichita // *Journal of Volcanology and Geothermal Research* – 2005. – Vol. 139 – No. 1–2 – P. 89–102.
3. Dattilo, G. Simulation of a cellular landslide model with CAMELOT on high performance computers / G. Dattilo, G. Spezzano // *Parallel Computing*. – 2003. – Vol. 29 – No. 10 – P. 1403–1418.
4. Hadjigeorgiou, J. Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model / J. Hadjigeorgiou, K. Esmaili, M. Grenon // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2009. – Vol. 24 – No. 3 – P. 296–308.
5. Pelinovsky, E., Poplavsky, A.: Simplified model of tsunami generation by submarine landslides. *Physics and Chemistry of the Earth* 21(1-2), 13–17 (1996)
6. Fuhrman, D. R., Madsen, P. A.: Tsunami generation, propagation, and run-up with a high-order Boussinesq model. *Coastal Engineering* 56(7), 747–758 (2009)
7. Zhou, H., Teng, M. H.: Extended fourth-order depth-integrated model for water waves and currents generated by submarine landslides. *Journal of engineering mechanics* 136(4), 506–516 (2010)
8. Smith, R. C., Hill, J., Collins, G. S., Piggott, M. D., Kramer, S. C., Parkinson, S. D., Wilson, C.: Comparing approaches for numerical modelling of tsunami generation by deformable submarine slides. *Ocean Modelling* 100, 125–140 (2016)
9. Salazar, F., Irazabal, J., Larese, A., Onate, E.: Numerical modelling of landslide-generated waves with the particle finite element method (PFEM) and a non-Newtonian flow model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 40(6), 809–826 (2016)

10. Lindstrom, E. K., Pedersen, G. K., Jensen, A., Glimsdal, S.: Experiments on slide generated waves in a 1: 500 scale fjord model. Coastal engineering 92, 12–23 (2014)
11. Fernandez-Nieto, E. D., Bouchut, F., Bresch, D., Diaz, M. C., Mangeney, A.: A new Savage–Hutter type model for submarine avalanches and generated tsunami. Journal of Computational Physics 227(16), 7720–7754 (2008)
12. Zakharov, Y. N. Numerical simulation of surface waves arising from underwater landslide movement / Y. N. Zakharov, A. I. Zimin // Conference Proceedings «Mathematical and Information Technologies MIT-2016». – 2017. – P. 535–546.
13. Zakharov, Y. N. Mathematical modeling of a hydraulic flume for carrying out numerical experiments on coastal waves and erosion of cohesive soil / Y. N. Zakharov, A. I. Zimin, I. S. Nudner, M. E. Yashin // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1441 – No. 1 – P. 012182.

### 4.3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Рассматривается движение многокомпонентной вязкой несжимаемой среды, у которой вязкость и плотность зависят от концентрации компонент, соответствующих воздуху, воде и намокшему связному грунту. Каждая из таких компонент представляется вязкой несжимаемой жидкостью с собственными значениями вязкости и плотности, предполагается возможность диффузии массы между этими компонентами. Движение такой многокомпонентной среды описывается нестационарной системой уравнений Навье-Стокса, учитывающей перечисленные выше эффекты, а перенос компонент среды – уравнениями конвективной диффузии и соотношениями для определения плотности и вязкости:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\rho \bar{V})}{dt} = -\nabla p + \operatorname{div}(\mu \mathbf{D}) + \rho \bar{f}, \\ \operatorname{div} \bar{V} = 0, \\ \frac{dC_1}{dt} = D_{12} \Delta C_1, \\ \frac{dC_3}{dt} = D_{23} \Delta C_3, \\ C_2 = 1 - C_1 - C_3, \\ \mu = \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{\mu_2 \mu_3 C_1 + \mu_1 \mu_3 C_2 + \mu_1 \mu_2 C_3}, \\ \rho = \rho_1 C_1 + \rho_2 C_2 + \rho_3 C_3, \end{array} \right.$$

где  $\bar{V}(\bar{x}, t) = (v_1, v_2, v_3)$  – вектор скорости смеси в точке  $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3)$  и момент времени  $t$ ,  $\mu(\bar{x}, t)$  – динамическая вязкость,  $\rho(\bar{x}, t)$  – плотность,  $C_1(\bar{x}, t)$ ,  $C_2(\bar{x}, t)$ ,  $C_3(\bar{x}, t)$  – объемные концентрации компонент с постоянными плотностями  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  и вязкостями  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$ ,  $\bar{f} = (f_1, f_2, f_3)$  – вектор массовых сил,  $p$  – давление,  $\mathbf{D}$  – тензор скоростей деформаций, компоненты которого равны  $\tau_{ij} = \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $D_{12} = \text{const}$  – коэффициент диффузии между первой и второй компонентой,  $D_{23} = \text{const}$  – коэффициент диффузии между второй и третьей компонентой.

Для численной реализации модели используется метод конечных разностей на прямоугольной неравномерной сетке с шахматным расположением узлов. При этом система

уравнений Навье-Стокса аппроксимируется схемой расщепления по физическим факторам с учетом переменной плотности, а для решения уравнений конвективной диффузии применяется схема предиктор-корректор.

#### 4.4. Полученные результаты

Для проверки поведения модели решается тестовая задача о движении оползня по наклонному дну, которое вызывает образование волн на поверхности воды. Результаты решения сравниваются с показаниями нелинейной модели мелкой воды [1]. На рисунке 1 представлено изменение формы жидкого и твердого оползней (обозначим эту форму как O1) и индуцированных ими поверхностных волн. На рисунке 2 приведены соответствующие этому расчету мареграммы.

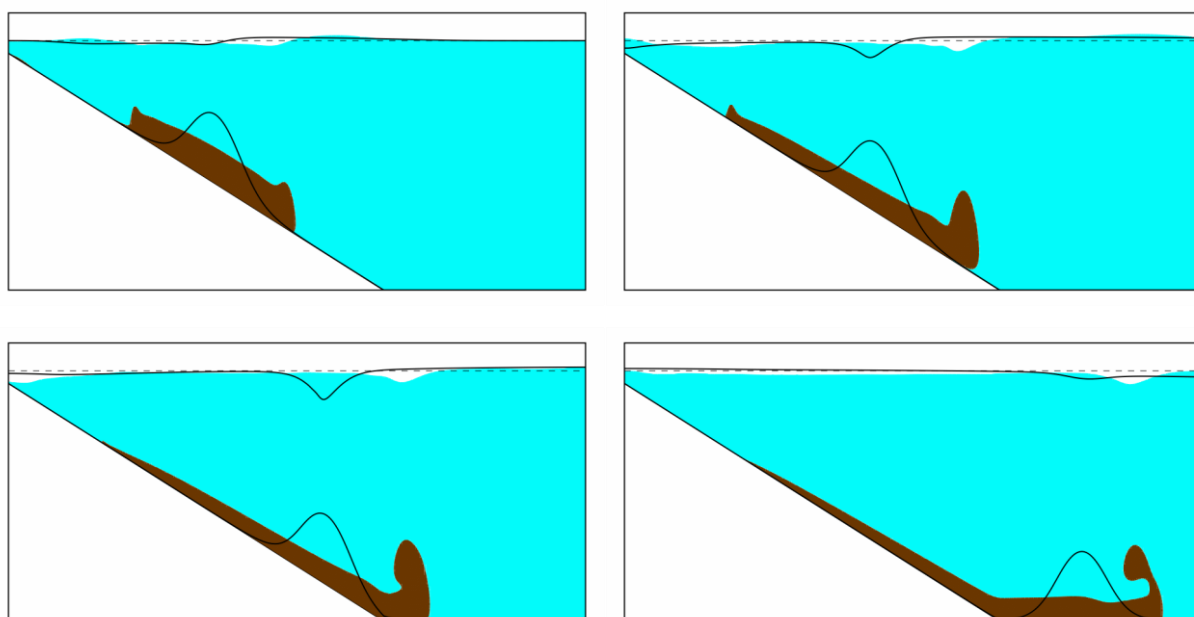


Рисунок 1 – Формы оползня O1 и поверхности на моменты времени 100, 200, 300 и 500 секунд (черная линия — нелинейная модель мелкой воды, цветной контур — трехкомпонентная модель).

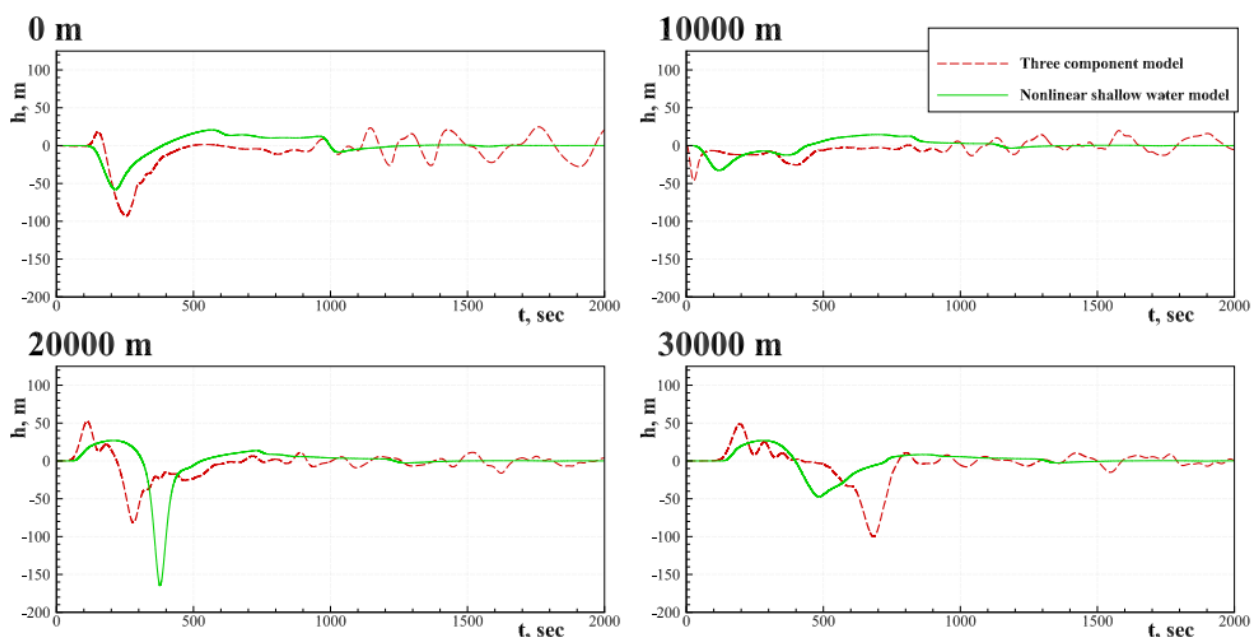


Рисунок 2 – Мареграммы волномеров для формы O1 в точках 0, 10000, 20000 и 30000 метров.

Как видно из рисунка 1, при начале движения жидкого оползня он распадается на две части. Одна часть оползня ожидаемо движется вниз по склону, а другая — вверх, создавая положительную волну в направлении левой стенки области. Поэтому было важно выяснить, как влияет на характеристики и скорость движения волны первоначальная форма оползня. На рисунках 3 и 4 представлены результаты движения оползня и соответствующие мареораммы для другой формы оползня (обозначим ее O2).

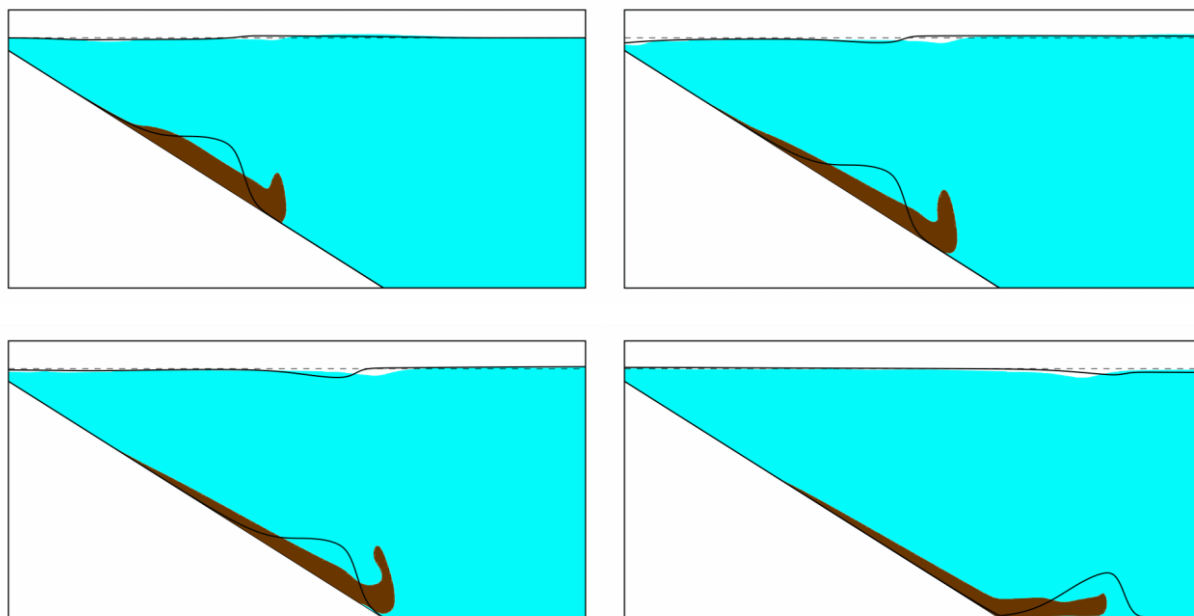


Рисунок 3 – Формы оползня O2 и поверхности на моменты времени 100, 200, 300 и 500 секунд (черная линия — нелинейная модель мелкой воды, цветной контур — трехкомпонентная модель).

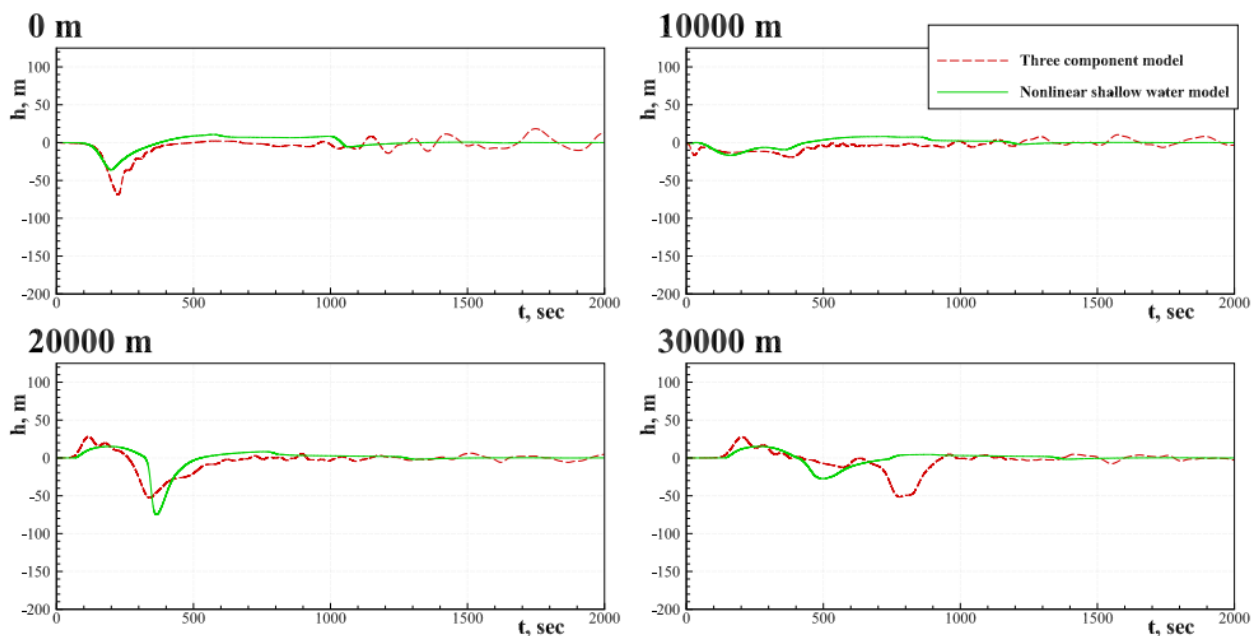


Рисунок 4 – Мареограммы волномеров для формы O2 в точках 0, 10000, 20000 и 30000 метров.

Выбор формы O2 продиктован желанием избавиться от эффекта распада жидкого оползня на склоне, что приводит к возникновению положительной волны вблизи левой границы. Таким образом, форма оползня не только влияет на характеристики движения поверхностной волны, но и

в определенных случаях может служить причиной возникновения дополнительных эффектов, например, движения положительной волны в сторону мелководья для жидкого оползня формы О1.

Далее для проверки моделирования селевого процесса рассматривается двухмерная задача о движении оползня на склоне р. Бурей. В качестве области решения используется поперечный профиль склона, реки и противоположного берега. На рисунке 5 представлена картина схода оползня, заполняющего собой русло реки и выталкивающее на берег большую массу воды.

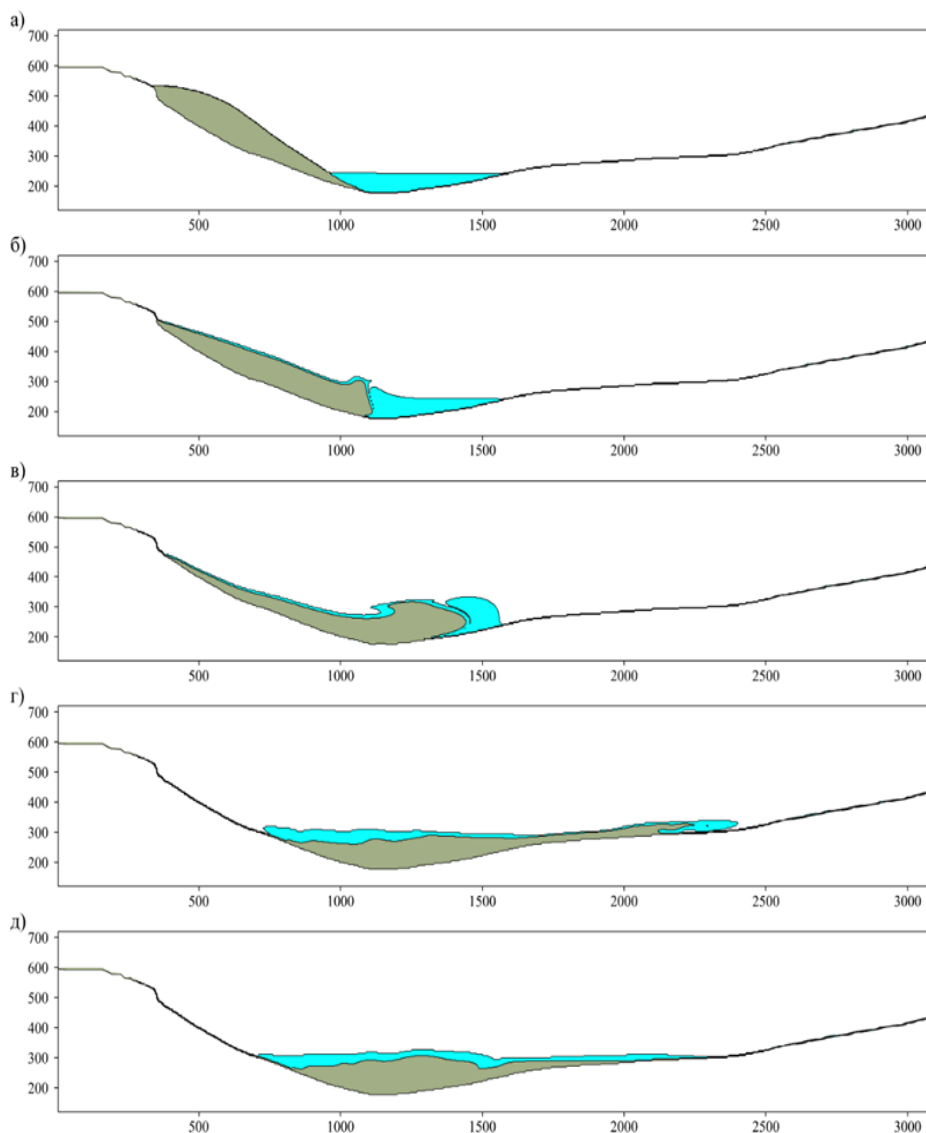


Рисунок 5 – Сход оползня на моменты времени (в секундах): а) 0, б) 10, в) 20, г) 80, д) 100.

Волна доходит до отметки 2400 м по горизонтали и 312 м по вертикали, что соответствует ее продвижению примерно на 1 км вверх по склону и согласуется с натурными данными [2].

Проведённые исследования дают возможность оценить характер движения индуцированной волны и степень возникающей опасности для прибрежных или береговых сооружений в зависимости от типа оползня и его формы.

1. Beizel, S. A., Chubarov, L. B., Khakimzyanov, G. S.: Simulation of surface waves generated by an underwater landslide moving over an uneven slope. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling 26(1), 17–38 (2011)
2. Махинов, А. Н. Крупный оползень в долине реки Бурей и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС / А. Н. Махинов, В. Ким, А. В. Остроухов, Д. В. Матвеев // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2019. – № 2 (204) – С. 35–44.

## **5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы**

Численное решение представленных задач требует построения достаточно подробной сетки, в связи с наличием свободной поверхности и неоднородности среды. На практике это приводит к значительным затратам оперативной памяти и увеличению времени счета. В таких условиях использование вычислительного кластера является обязательным и позволяет проводить все необходимые расчеты за разумное время.

## **6. Перечень публикаций, содержащих результаты работы**

- Beizel, S. A. Two Models of Surface Waves Propagation Generated by an Underwater Landslide Movement / S. A. Beizel, Y. N. Zakharov, A. I. Zimin // Совместный выпуск по материалам Международной конференции Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании (CITech-2020). – 2020. – С. 82-93.
- Захаров, Ю. Н. Численное моделирование схода грязевого оползня в водный бассейн / Ю. Н. Захаров, А. И. Зимин, М. Е. Яшин // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. – 2022. – С. 222-225.